

# ERIKOISTERMOVAA'AN KUNNOSTUS JA OHJELMOINTI

Juho Aho

Opinnäytetyö  
Huhtikuu 2011

Automaatiotekniikka  
Tekniikan ja liikenteen ala



JYVÄSKYLÄN AMMATTIKORKEAKOULU  
JAMK UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Tekijä(t) AHO, Juho	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 11.04.2011
	Sivumäärä 63 + CD-levy	Julkaisun kieli Suomi
	Luottamuksellisuus ( ) saakka	Verkojulkaisulupa myönnetty ( X )
Työn nimi ERIKOISTERMOVAA'AN KUNNOSTUS JA OHJELMOINTI		
Koulutusohjelma Automaatiotekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) SELOSMAA, Seppo		
Toimeksiantaja(t) Jyväskylän yliopisto, Bio- ja ympäristötieteiden laitos, Uusiutuva energia. AGAR, David, JÄMSÉN, Miia WIHERSAARI, Margareta		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Jyväskylän yliopiston uusiutuvan energian – koulutusohjelma käyttöön hankittiin VTT:ltä vanha erikoistermovaaka, jolle opinnäytetyönä suoritettiin laitepäivitys ja mittausohjelmiston luonti. Laite toimitettiin yliopistolle toimivana kokonaisuutena mutta minimaalisin anturoinnein.</p> <p>Työ sisälsi esisuunnittelu-, perussuunnittelu- ja toteutusvaiheen. Työ suoritettiin ja testattiin toimeksiantajan tiloissa suunnitellulla kokoonpanolla.</p> <p>Termovaa'an ohjaukseen luotiin LabView-sovellus, jonka avulla voitiin mittauksen aikainen datan keruu ja prosessin säätö automatisoida. Mittauslaitteen lämpötilamittauksen anturointia lisättiin ja kaasuvirtauksen säätö- ja mittauslaitteet päivitettiin sähköisesti ohjattaviksi.</p> <p>Opinnäytetyön tulokseksi saatiin toimiva mittauslaitteisto joka soveltuu niin tieteelliseen tutkimukseen kuin opetuskäyttöön.</p> <p>Opinnäytetyön pohjalta yliopisto voi laajentaa laitteen toiminta-aluetta ja mahdollisten analyysien määrää monipuolistamalla antureita ja laitekantaa.</p>		
Avainsanat (asiasanat) LabView, Termoanalyysi, Termogravimetri		
Muut tiedot		



Author(s) AHO, Juho	Type of publication Bachelor's Thesis	Date 11042011
	Pages 63 + CD-rom	Language Finnish
	Confidential  ( ) Until	Permission for web publication ( X )
Title RECONDITIONING AND PROGRAMMING THE SPECIALIZED THERMOGRAVIMETRY		
Degree Programme Automation engineering		
Tutor(s) SELOSMÄÄ, Seppo		
Assigned by University of Jyväskylä, Department of Biology and Environmental Science, renewable energy AGAR, David, JÄMSÄN, Miia WIHERSAARI, Margareta		
<p>Abstract</p> <p>Renewable energy program in university of Jyväskylä acquired a specialized thermogravimetry for loan from VTT for a period of five years. Thermogravimetry was delivered as a fully functional unit but with minimal documentation. Reprogramming and instrumentation upgrade was made as a bachelor's thesis for the Jyväskylä university of applied sciences.</p> <p>Thesis included pre planning with basic design and assembly phases. Planning, programming and configuration was conducted and thoroughly tested at the university of Jyväskylä.</p> <p>Automation program for control and data acquisition was made within LabView-environment. Devices thermal measurement was expanded with extra instrumentation and gas flow controls along with indicators were upgraded to be digitally controlled.</p> <p>As a result, a fully functional measurement application for scientific research and student projects was made.</p> <p>From the basis of thesis a university may expand and diversify the amount of possible analysis. Broadening the scope of measured values (with additional instrumentation) and extending the device with additional measurement unit's university may easily extend the abilities of device.</p>		
Keywords LabView, Thermal analysis, Thermogravimetry		
Miscellaneous		

## SISÄLTÖ

1	TYÖN LÄHTÖKOHDAT .....	4
1.1	Johdatus tehtävään .....	4
1.2	Jyväskylän yliopisto.....	4
1.3	Uusiutuvan energian ohjelma .....	5
1.4	Erikoistermovaaka .....	6
2	TERMINEN ANALYYSI .....	7
2.1	Terminen analyysi.....	7
2.2	Termogravimetri.....	8
3	MITTAUSLAITTEISTO JA SÄÄDIN .....	10
3.1	Termoparit.....	10
3.2	Tilavuusvirtamittaus .....	11
3.3	PID-säädin .....	12
4	TESTAUSLAITTEISTON TOTEUTUS.....	14
4.1	Määrittelyvaihe.....	14
4.1.1	Esisuunnittelu .....	14
4.1.2	Perussuunnittelu .....	15
4.2	Suunnitteluvaihe.....	16
4.2.1	Ohjelmistosuunnitteluvaihe.....	16
4.2.2	Kokoonpano ja instrumentointi .....	17
5	LAITTEISTON TOIMINNALLISUUS JA KÄYTTÖ.....	18
5.1	Lämpötilamittaus ja säätö .....	18
5.2	Sähkökaappi.....	19
5.3	Massanmittaus .....	20
5.4	Kaasuvirtaus.....	21
5.5	Jännitteenvahvistusyksikkö .....	23
5.6	KytKentäblokki .....	23
6	OHJELMAN TOIMINNALLISUUS JA KÄYTTÖ .....	24
6.1	Toiminnallisuus.....	24
6.1.1	Perusrakenne .....	24
6.1.2	Säädin .....	25
6.1.3	Datan keruu .....	28
6.1.4	Lämpötilamittaus .....	29

6.1.5	Massan mittaus .....	30
6.1.6	Virtausmittaus .....	31
6.2	Käyttöliittymä .....	31
6.2.1	Rakenne .....	31
6.2.2	Ajonaikainen informaatio.....	33
6.2.3	Kuvaajat .....	34
6.2.4	Ohjelmalaajennukset .....	34
6.3	Testausympäristö .....	35
6.3.1	Mittauksen esitiedot .....	35
6.3.2	Esiaskelen käyttö .....	35
6.3.3	Mittausohjelman luonti.....	36
6.4	Tulosten hallinta .....	36
6.4.1	Tulosten tallennus ja arkistointi.....	36
6.4.2	Excel dokumentointi.....	37
6.4.3	Tulostaminen.....	38
6.4.4	HTML-tallennus .....	38
6.5	Virhetilanteiden hallinta ja turvallisuus.....	38
7	TULOKSET .....	39
7.1	Toiminnallisuus .....	39
7.2	Ongelmat .....	40
7.2.1	Ohjelmistolliset ongelmat .....	40
7.2.2	Laitteistolliset ongelmat.....	43
7.3	Laajennusmahdollisuudet tulevaisuudessa.....	44
7.4	Pohdinta.....	45
8	LÄHTEET .....	47
9	LIITTEET .....	48
	LIITE 1 Positionti .....	48
	LIITE 2: Kytkenälistä.....	49
	LIITE 3: Mittapistet.....	50
	LIITE 4: PI-kaavio .....	51
	LIITE 5: Kytkenäkaaviot (1/5).....	52
	LIITE 6: PID-säätöikkuna .....	57
	LIITE 7 Ohjelma-välilehti .....	58

LIITE 8. Tulokset-välilehti .....	59
LIITE 9. Asetukset-välilehti.....	60
LIITE 10 Virheellinen derivaatan muodostus.....	61
LIITE 11 Keskiarvoistetu derivaatta .....	62
LIITE 12 Lämpötilavirhe .....	63

## KUVIOT

KUVIO 1. Erikoistermovaa'an rakenne .....	9
KUVIO 2. Termoparin kytkentäperiaate.(kuvaa muokattu, vrt. Pietiko 2009, 1) .....	10
KUVIO 3. Lämpötilaeroon perustuvan tilavuusvirtausmittauksen periaate .....	12
KUVIO 4. PID-säätimen toimintaperiaate. ....	13
KUVIO 5. Termoparien sijoitus kvartsiputkessa.....	18
KUVIO 6. Sähkökaapin lähtövirta ohjausjännitteen funktiona. ....	20
KUVIO 7. Vaa'an sijoitusperiaate. ....	21
KUVIO 8. Kaasuvirtaus laitteessa .....	22
KUVIO 9. SCB-68, Shielded Connector Block.....	24
KUVIO 10. Säätimen yksinkertaistettu ohjelmarakenne.....	25
KUVIO 11. Lämpötilan nousuprofiili.....	27
KUVIO 12. Keräysehto .....	28
KUVIO 13. Käyrän tasaaminen .....	29
KUVIO 14. Vaa'an mittausdatan muokkaaminen.....	30
KUVIO 15. Anturikohtainen prosessinseuranta .....	33
KUVIO 16. Esiaskelen hallintapaneeli.....	35
KUVIO 17. Kansipohjaisen tietokannan rakenne .....	37
KUVIO 18. Liukuva keskiarvoistus .....	42

# 1 TYÖN LÄHTÖKOHDAT

## 1.1 Johdatus tehtävään

Jyväskylän yliopiston uusiutuvan energian – koulutusohjelma laajensi mittauslaitekantaansa uudella termovaa’alla, joka saatiin viiden vuoden sopimuksella lainaan valtion teknilliseltä tutkimuskeskukselta (VTT). Yliopiston ehdotuksesta laitteen saataminen käyttökuntoon ja mittausohjelman luonti annettiin Jyväskylän ammattikorkeakoululle opinnäytetyöaiheena.

Opinnäytetyössä laite saatettiin sellaiseen kuntoon, jossa sitä voitaisiin hyödyntää tutkimus – ja opetuskäytössä. Laite huollettiin ja osia laitteesta päivitettiin. Työn aikana luotiin myös laitteelle mittausohjelmisto, jolla kyetään automatisoimaan osia mittauksista ja pystytään tallentamaan mittaustuloksia.

Laite – ja ohjelmistosuunnittelu toteutettiin yhteistyössä uusiutuvan energian - koulutusohjelman tutkijoiden Miia Jämsén ja David Agar kanssa.

Mittausohjelman luonti ja laitteiston luotettavuuden parantaminen osoittautui haasteelliseksi tehtäväksi mutta lopputuloksena tuotettiin toimiva kokonaisuus.

## 1.2 Jyväskylän yliopisto

Jyväskylän yliopisto on kansallisesti ja kansainvälisesti merkittävä tiedeyliopisto, joka keskittyy ihmistieteisiin ja luonnontieteisiin. Yliopisto on maamme johtava koulutuksen asiantuntija, opettajankouluttaja, aikuiskouluttaja ja koulutusviejä. Liikunta- ja terveystieteiden kokonaisuus on maan ainoa. Opiskelijarekrytointinsa perusteella Jyväskylä on yliopistoista valtakunnallinen.

Yliopisto operoi monitieteisesti koko ihmisen elämäncyklin ja innovaatioiden ekosysteemin alueella. Teknologia- ja innovaatioprofiiliin kuuluvat kiihdytinpohjainen teknologia, nano- ja paperinvalmistusteknologia, ICT, hyvinvointi-, liikunta- ja terveysteknologia, opetus-

teknologia ja musiikkiteknologia. (Jyu 2011)

### **1.3 Uusiutuvan energian ohjelma**

Jyväskylän yliopistossa käynnistettiin uusiutuvan energian poikkitieteellisen koulutus- ja tutkimusohjelman (UE-ohjelma) valmistelu vuonna 2001. Tavoitteena oli luoda Jyväskylään kansainvälisesti tunnettu yliopistotasoinen uusiutuvan energian koulutus- ja osaamiskeskittymä, joka tukeutuu yliopistossa olleeseen ja lisäresursseilla kehitettävään UE- koulutukseen ja tutkimukseen sekä seutukunnan monipuoliseen energiaosaamiseen ja myös valtakunnalliseen sekä eurooppalaiseen verkottumiseen.

Ohjelman tavoite on vastata osaltaan Kioton ilmastopimuksen Suomelle asettamiin kansainvälisiin tavoitteisiin kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi ja edesauttaa EU:n ja Suomen hallituksen energia- ja ilmastopolitiikan sekä uusiutuvan energian edistämiseksi asettamien tavoitteiden toteutumista myös EU:n vuoden 2020 energia- ja ilmastotavoitteiden osalta.

Ohjelmassa ovat mukana bio- ja ympäristötieteiden, fysiikan ja kemian laitokset sekä, vuoteen 2010 asti, taloustieteiden tiedekunta (yritysten ympäristöjohtaminen) ja yhteiskuntatieteen ja filosofian laitos (yhteiskuntapolitiikka ja sosiologia), joista ohjelmassa on mukana viisi professoria tutkimusryhmineen (ml. yliopisto-opettajia).

UE -ohjelma käynnistettiin konkreettisesti 1.1.2003 UE-maisterikoulutuksella ja ulkoisella rahoituksella resursoituilla tutkimus- ja demonstraatiohankkeilla. Vuosina 2003–2007 UE -koulutuksen ja tutkimuksen kehittämisen edellyttämää hankehenkilöstöä (ajoittain 1-2 tutkimusjohtajaa, 2-3 tutkijaa, laboratorioinsinööri) sekä laite- ja tutkimusinfraa on rahoitettu alueellisten toimijoiden ja Länsi-Suomen Läänin hallituksen myöntämin EU:n aluekehittämisvaroin (1,6 milj.€; 1.1.2003–31.12.2005) ja ESR -rahoituksella (Hajautettujen energiajärjestelmien koulutusohjelmalle Henko; 1.1.2006–30.6.2007). Opetusministeriön UE -ohjelmalle myöntämä rahoitus vuosille 2007 - 2009 on merkinnyt ohjelman statuksen muuttumista pitkäjänteisemmäksi.



UE- ohjelman tavoitteena on kehittää ja vakiinnuttaa ohjelman resursseja kansainvälisesti kilpailukykyisen koulutukseen ja tutkimukseen. UE-ohjelman nykyresursseihin perustuva koulutuksellinen tavoite on vuosittain 10–15 maisterin tutkintoa ja 2-3 väitöskirjaa. Tutkimuksen painopisteenä on erityisesti hajautetut ja integroidut uusiutuvat energiateknologiat ja järjestelmät. (Jyu 2011, Maunuksela 2011)

## **1.4 Erikoistermovaaka**

Erikoistermovaaka on kehitetty VTT:n toimesta yksittäisten kiinteiden partikkelien palamiskokeiden suorittamiseen. Laite on suunniteltu vuonna 1982 ja toiminta pohjautuu yleisen termogravimetrianalyysin periaatteeseen. Laite valmistui vuonna 1983. VTT suoritti laitteistolla lukuisia poltto – ja arinakokeita sekä muita termisen analyysin testejä vuosina 1983–2009. Vuonna 2010 laite luovutettiin viideksi vuodeksi lainaan Jyväskylän yliopiston Uusiutuvan energian – koulutusohjelman tutkimus – ja opetuskäyttöön.

Laite kehitettiin suorittamaan polttokokeita yli gramman suuruisilla kappaleilla, aina n.300 g:n asti. Laitteen kaasuvirtauksessa voidaan näin analysoida suurempia partikkeleita kuin useimmissa kaupallisissa versioissa. Yksinkertaisesta rakenteestaan huolimatta laite on ollut aikoinaan hyvin kallis ja vaikea suunnitella sekä toteuttaa.

## 2 TERMINEN ANALYYSI

### 2.1 Terminen analyysi

Brown (2001, 2) ja Haineksen (2002, 10) mukaan International Confederation of Thermal Analysis and Calorimetry (ICTAC) määrittelee termisen analyysin seuraavasti:

“Thermal Analysis (TA) is the study of the relationship between a sample property and its temperature as the sample is heated or cooled in a controlled manner”.

Haines (2002, 4.) tarkentaa termisen analyysin määrittystä yleisnimitykseksi tekniikoille, joilla aineen ominaisuuksia tutkitaan ohjatussa lämpötilaohjelmassa. Mahdolliset lämpötilaohjelmat voidaan esittää seuraavasti:

- a) Näyte altistetaan jatkuvalle tasaiselle lämmitykselle tai viilennykselle (esim. 10 astetta/min)
- b) Näyte on isotermisessä, vakaassa, lämpötilassa
- c) Moduloitu lämpötilaohjelma, jolloin lämmitys-/viilennysprosessia moduloidaan esim. sinimuotoiseksi (tasaisesti, tai epätasaisesti vaihtelevaksi)
- d) simuloidaan tuotantoprosessia, jolloin voidaan käyttää porrasmaista tai hyvinkin monimutkaista lämmitys/viilennys -ohjelmaa.
- e) Lämmitys vastaa aineen muutosta

Terminen analyysi tutkii siis näytteen käyttäytymistä lämpötilan hallittuna muutoksena, hallituissa olosuhteissa. Yksinkertaisimmillaan voidaan tutkia ainoastaan näytteen lämpötilan vaihtelua mutta olosuhteisiin voi kuulua myös joko oskilloiva, tasaisesti vaihteleva, tai tasainen mekaaninen rasitus ja eri reaktiokaasut, riippuen tutkitavasta aineen tutkittavasta ominaisuudesta. (Brown 2001, 13.)

Termoanalyttiset tutkimusmenetelmät jakautuvat tutkittavien ominaisuuksien (mm. lämpötila, paine, rakenne, ym.) mukaisesti erillisiksi testeiksi. Näitä testejä ovat esimerkiksi: Termometria, Differentiaalinen termometria, termogravimetria ja terminen

optometria. Testit mittaavat yhden, tai useamman ominaisuuden muutosta näytteessä. Nämä perusrakenteiden ominaisuuksia tutkivat primääriset menetelmät ovat synnyttäneet myös kehittyneempiä, alempien tasojen muutoksia tutkivia menetelmiä. Nämä spesiaaliset menetelmät tutkivat mm. nanometri-tasolla tapahtuvia muutoksia sekä laajentavat primäärimenetelmien testialuetta. (Mts. 6-8.)

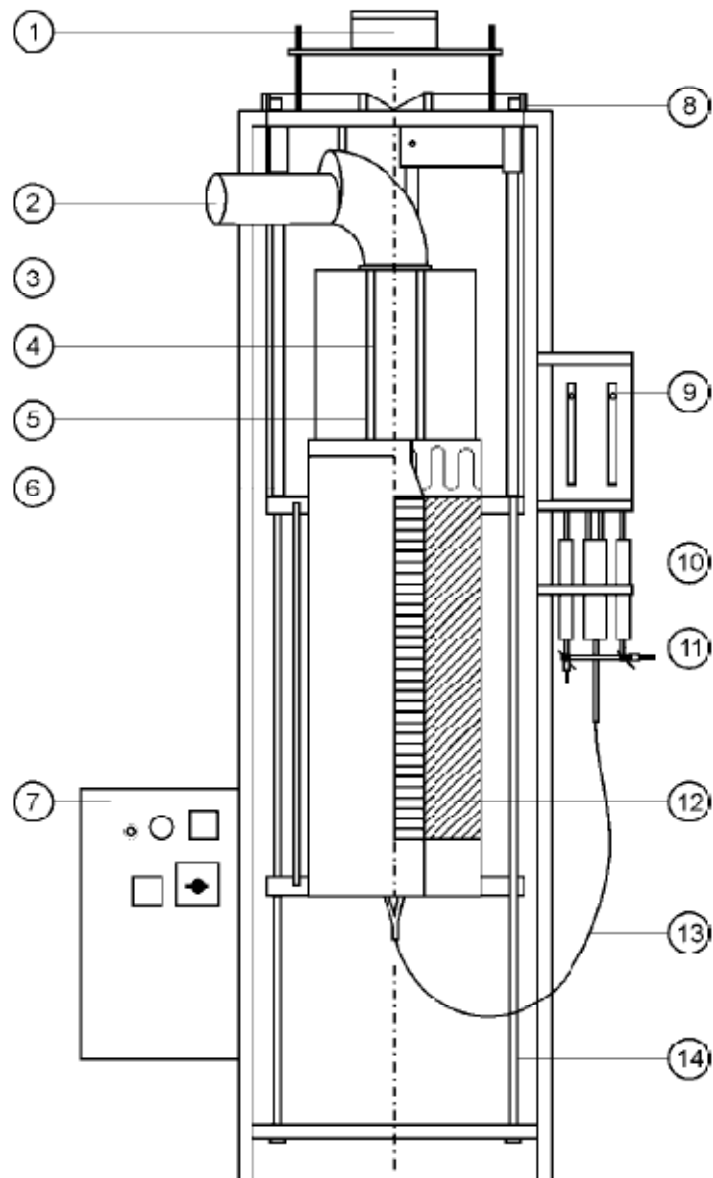
## 2.2 Termogravimetri

Termogravimetri on mittauslaite, jolla tutkitaan näytteen massan muutosta lämpötilan tai ajan funktiona. Laite koostuu elektronisesta vaa'asta, säädettävästä lämpötilaelementistä, reaktiokaasusta ja mittaustiedon keräävästä tietokoneesta. Näyte asetetaan lämpötilaelementin lähelle siten, että reaktiokaasulla siirrettävä lämpötila lämmittää näytteen. Näyte kytketään vaakaan jotta massan muutosta voidaan mitata reaaliajassa. Mittausdatan keräävä komponentti (tietokone) kerää mittaussolusta lämpötilan ja massan muutoksen sekä kaasun virtauksen lämmitys-/viilennysohjelman ajalta. (Haines 2002, 10-17.)

Brown (2001, 19.) tarkentaa Haineksen (2002, 10) termogravimetrin määritelmää ja kokoonpanoa näytekappaleen sijoituksen osalta. Hän määrittää näytekappaleen sijainnin laitteessa suoraan uunin sisään mutta neuvoo eristämään vaa'an mahdollisilta lämpövuodoilta.

Käytetty reaktiokaasu voi olla, tarkoituksesta riippuen, ominaisuuksiltaan inertti, haittava, pelkistävä tai syövyttävä. Kaasun virtauksessa tulee kiinnittää huomiota näyteastian kelluvuuteen, joka voi aiheuttaa virhettä vaa'an massan määrittämisessä. (Brown 2001, 24.)

Termogravimetri voidaan toteuttaa usealla eri tavalla, joita kaikki yhdistää massan mittaaminen hallitussa kaasun- ja lämpötilakentässä, ja kaupallisesti onkin saatavilla useiden eri valmistajien eri periaatteilla toteutettuja termovaakoja. Yliopiston käyttöön lainatun erikoistermovaa'an rakenne on kuvattu kuviossa 1. (kuva David Agar, 2010)



Kuva 1. Termovaakalaitteisto: (1) erikoisvaaka, (2) savukaasun poistoputki, (3) tukikohikko, (4) kvartsiputki, (5) lämpökestävä lasiputki (6) sylinteriuuni (7) sähkökaappi (8) nostolaittejärjestelmä (9) rotametrit (10) reaktiokaasujen kuivauskennot (silikageeli) (11) kaasun sekoitin (12) lämpöelementti: (3 kW) (13) kaasun syöttöputki (14) nostolaittejärjestelmän vertikaalinen oljauustanko.

KUVIO 1. Erikoistermovaa'an rakenne

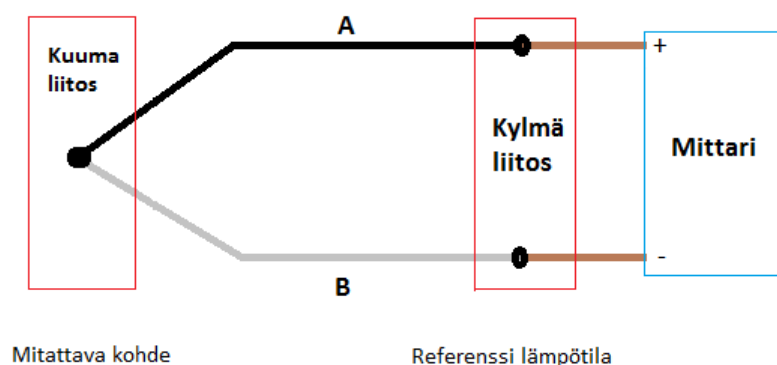
### 3 MITTAUSLAITTEISTO JA SÄÄDIN

#### 3.1 Termoparit

Termoparit ovat hyvin yleisesti käytettyjä lämpötila-antureita. Ne ovat halpoja rakentaa ja omaavat laajan lämpötila-alueen. Anturi on yksinkertainen, ja se voidaan rakentaa aina halutun kokoiseksi. (Pietiko 2009, 1.)

Termopari perustuu nk. Seebeckin ilmiöön jonka löysi vuonna 1821 virolainen fyysikko Thomas Seebeck. Kahdesta eri metallista valmistetusta johtimesta koostuva anturi, jonka ns. kylmän ja kuuman liitoksen välille syntyy lämpötilaerosta riippuva jännite. Ilmiö on toistettavissa useimmilla metalleilla mutta standardoitujen parien tapauksessa jännitteet ovat stabiileja, sekä suhteellisen suuria. (ASTM 1981, 3.)

Kuviossa 3 on esitetty termoparin toimintaperiaate. Kun harmaa ja musta johdin (A ja B) yhdistetään ja luodaan anturille mittauspää, niin lämpötilaero mitattavan kohteen ja referenssi lämpötilan välissä aiheuttaa lämpötilaerosta riippuvaisen jännite-eron johtimiin. Referenssipisteessä oleva kylmä liitos pidetään vakaassa lämpötilassa (0 °C tai huoneen lämpötila), jolloin lämpötilaero on helppo määrittää. Termopareilla on tavallisesti suhteellisen pieni virhemarginaali (0.5 °C), joka on riippuvainen käytetyistä metalleista. (Pietiko 2009, 1.)



KUVIO 2. Termoparin kytkentäperiaate.(kuvaa muokattu, vrt. Pietiko 2009, 1)

Erikoistermovaa'an lämpötilamittaukseen termoparit valittiin niiden pienen termisen massan ja herkkyyden vuoksi, jonka vuoksi anturipäät lämpenevät hyvin nopeasti kaasuvirran lämpötilaan. Termoparimittauksella voidaan näin mitata palamiskokeiden kannalta tärkeitä, hyvin nopeita lämpötilanvaihteluita. Mittauspäiksi valittiin K-tyyppin termoparit, valmiiksi asennettujen R-tyyppin parien lisäksi.

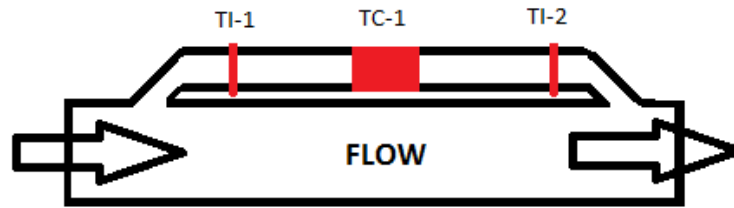
K-tyyppin termoparit ovat halvimpia tuottaa ja näin yleistyneet teollisuudessa ja kotitalouksissa. Termopari koostuu tavallisesti chromel (CrNi) - alumel (AlNi) parista ja pystyy tyyppillisesti mittaamaan lämpötila-alueella  $-100 \dots +1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Herkkyydellä  $40 \text{ } \mu\text{V}/\text{C}$ . (Mts. 2.)

R-tyyppin termoparit ovat K-tyyppiin verrattuna, kalliimpia valmistaa niiden sisältämän platinan vuoksi. Tavallisimmin termopari koostuu platina – ptRh parista ja pystyy tyyppillisesti mittaamaan lämpötila-alueella  $-50 \dots +1760 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Herkkyydellä  $10 \text{ } \mu\text{V}/\text{C}$ . (Mts. 2.)

### 3.2 Tilavuusvirtamittaus

Virtausmittauksessa ja tilavuusvirran säädössä käytetään massavirtausmittaria, jossa on sisäänrakennettu säätöventtiili. Hankittu säädin/anturi on periaatteeltaan termisen sovellus. Termiseen mittaukseen pohjautuvan mittarin rakenne on esitetty kuviossa 3. Kuvio on piirretty Löttersin (2005) artikkelin sekä mittarin mukana toimitettujen dokumenttien pohjalta.

Mittarissa kulkevan virran osaa lämmitetään vakiotehoisella vastuslangalla. Mittaamalla kaasun lämpötilaa lämmityselementin molemmin puolin voidaan virtausarvo laskea sen ollessa suoraan verrannollinen lämpötilaeroon kahden mittapisteen välillä. Mittauksessa on huomioitava myös itse aineen (neste tai kaasu), sekä sen lämpötilan aiheuttama vaikutus mitattavaan lämpötilaeroon. (Lötters 2005)



KUVIO 3. Lämpötilaeroon perustuvan tilavuusvirtausmittauksen periaate

### 3.3 PID-säädin

PID säädin muodostuu vahvistuskertoimen, integraalikomponentin ja derivaatan lausekkeesta, jossa komponenttien parametreja vaihtelemalla voidaan saavuttaa haluttu häiriösietoinen ja viiveistetty ohjauselementti.

Ideaallinen, jatkuva PID-säädin nk. SISO (single input single output) järjestelmässä voidaan ilmaista Laplace muunnoksena:

$$U(s) = G_c(s)E(s) \quad (1.1)$$

, jossa

$$G_c(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (1.2)$$

, parametrien ollessa  $K_c$  = vahvistuskerroin,  $T_i$  = integraalinen aikavakio,  $T_d$  = derivoituva aikavakio. Ideaalisen säätimen käsitys on teknologian kehittyessä monipuolistunut ja nykyään tunnetaankin 18 eri ideaalista säädinalgoritmia, joista jokainen on räätälöity eri olosuhteiden ja säätövaatimusten mukaisesti. (O'Dwyer 2006, 5-11.)

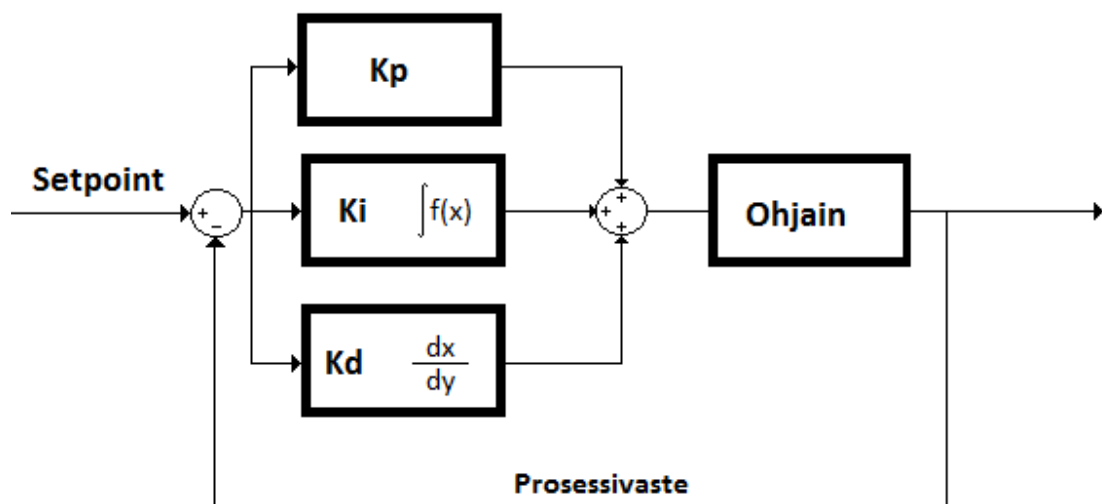
Työssä käytetty PID-säädin on muodoltaan yksinkertaistettu, ns. vahvistimesta riippumaton algoritmi, jossa siirtofunktio on muotoa:

$$G_c(s) = K_c + \frac{1}{T_i s} + T_d s \quad (1.3)$$

Kaava 1.3 on muodostettu O'Dwyerin (2006, 7.) esittelemän säädinalgoritmin pohjalta. Yhdistämällä siirtofunktion 1.3 alkuperäiseen Laplace-muunnokseen (1.1), voidaan säätimen yhtälö kirjoittaa muodossa:

$$U(s) = \left( K_c + \frac{1}{T_{is}} + T_d s \right) E(s) \quad (1.4)$$

Yhtälön 1.4 pohjalta määritettiin kuvion 4 kaltainen säädinrakenne.



KUVIO 4. PID-säätimen toimintaperiaate.

Kuvion 5 pohjalta laadittiin PID-säädin käyttämällä LabView - ympäristön tarjoamia matematiikkablokkeja. Käyttämässämme LabView:n versiossa ei ollut saatavilla valmista PID-blokkia.

Mittausohjelmisto käyttää ajonaikaisessa lämpötilan hallinnassa PID-säädintä, jonka avulla systeemin lämpötila voidaan automaattisesti säätää tavoitearvoon. Tehdasasenteinen PID-säädin löytyy myös erikoistermovaa'assa käytetyistä massavirtausmittareista, jossa ne säätävät venttiilien asentoa. Mittausohjelmassa käytetyn säätimen toiminta ja rakenne on esitelty tarkemmin kappaleessa: 6.1.2 Säädin.



## 4 TESTAUSLAITTEISTON TOTEUTUS

### 4.1 Määrittelyvaihe

#### 4.1.1 Esisuunnittelu

Esisuunnitteluvaiheessa laitteiston tarpeita lähdettiin kartoittamaan toimeksiannon pohjalta.

Lopputuotteen tulisi kyetä palvelemaan luotettavana mittausyksikkönä ainakin seuraavat viisi vuotta. Laitteiston tulisi koostua riittävästä lämpötilanmittauksista, jotta erimuotoisten ja kokoisten kappaleiden sisälämpötila, sekä kaasuvirran lämpötila voidaan luotettavasti mitata. Laite tulisi muuntaa sopivammaksi nykyiseen huoneeseen.

Tuotetun laitteiston ja ohjelmiston tulisi täyttää seuraavat ominaisuudet:

- Kaasuvirran lämpötilan mittaaminen
- Kappaleen sisälämpötilan mittaaminen
- Kappaleen massan mittaaminen
- Kaasuvirran tilavuusvirtauksen mittaaminen
- Derivaatan laskeminen massakäyrälle
- Massakäyrän muuntaminen prosenteiksi
- Mittaustulosten esitys ja tallennus
- Säädettävä kaasuvirran lämpötila ja tilavuusvirtaus

## **Toiminnan esisuunnittelu**

Prosessista on tarkoitus mitata kolmea parametria: lämpötila, massa ja virtaus. Lämpötilaa ja kaasun tilavuusvirtausta säädetään käyttäjän määrittämän asetusarvon mukaisesti. Massasta kerätään ainoastaan mittaustietoa.

Lämpötila määritetään useasta pisteestä sekä oletetun kappaleen riippumiskorkeudelta (nk. näytetilasta), että lämmityskattilan sisästä. Mittauksen tulee olla tarpeeksi herkkä jotta se kykenee mittaamaan nopeasti muuttuvia kaasun lämpötiloja. Tilavuusvirtausmittausta ja -säättöä varten hankitaan sähköisesti ohjattavissa oleva yksikkö entisen analogisen tilalle. Entinen venttiiliyksikkö ohitetaan kokonaan.

Mittaustiedon keräys hoidetaan mittausohjelmistolla.

### **4.1.2 Perussuunnittelu**

Perussuunnittelu vaiheessa laitteen kunto arvioitiin ja tarvittavien laajennusten osalta toteutettiin alustavat tarjouspyynnöt. Perussuunnitteluvaiheessa laitteiston toimintakuvaa muokattiin siten, että tilavuusvirtausta ohjataan suhdesäätönä kahden eri kaasun välillä. Laitteen ja tilatun laitteiston asennusten vaatimat metallityöt tilattiin laitokset sisäiseltä työpajalta.

#### **Lämpöanturit**

Lämpöantureiden terminen massa tuli olla tarpeeksi pieni jotta ne kykenisivät mittaamaan tarkasti kaasun lämpötilaa. Antureiden tuli kestää 800 °C lämpötiloja ja olla taivuteltavissa kappaleiden ympärille ja/tai sisään. Tarjouspyynnöt esitettiin K-tyyppin termopareista.

#### **Tilavuusvirtausmittari**

Tilavuusvirtausmittari korvaa vanhan analogisen mittauksen ja sen tulee olla sähköisesti ohjelmaan kytkettävissä. Kaasu virtauksen tuli olla myös ohjattavissa sekä kahden eri kaasun virtausten suhteen säädettävissä. Tarjouspyynnöt esitettiin massavirtausmittareista, joissa oli integroituna virtauksen säätö ja mittaus.

## **Muut**

Tilausten yhteydessä tehtiin tarjouspyynnöt oheislaitteistoista ja –osista. Hankittiin uusia kvartsi – ja lasiputkia kaasuvirran ohjaukseen sekä kompensointiliittimiä ja –kaapeleita termoparien asennukseen.

Laitehankintojen myötä viimeisteltiin suunnitteludokumenteista positionitunnuslista (Liite 1.) sekä mittapistelista (Liite 3.) Laitteiston ollessa tiedossa viimeisteltiin myös Input/Output – kytkentälista (Liite 2.), jossa anturien kytkentä analogia kanaviin ja tietokoneeseen määriteltiin tarkasti. Viimeiseksi perussuunnitteluvaiheessa selvitettiin sähkökaapin toiminta ja sen ohjauskaapeleiden järjestys.

Kytkenäsuunnittelun myötä luotiin myös laitteiston kytkentäkaaviot (liite 5) sekä PI-kaavio (liite 4).

## **4.2 Suunnitteluvaihe**

### **4.2.1 Ohjelmistosuunnitteluvaihe**

#### **Kehitysympäristöt**

Termovaa’an mittausohjelmisto laadittiin National Instruments LabView 7.0 sovelluskehitysympäristössä. Mittausohjelmiston tueksi kehitetty ohjelmistolaajennus kehitettiin käyttämällä Microsoft Visual Studio 2010 Express –kehitysympäristöä.

#### **Ohjelmointikielet**

Mittausohjelmisto kehitettiin National Instrumentsin LabView – ympäristössä käytettävällä graafisella koodikielellä, eli nk. G-kielellä. Mittausohjelmiston laajennukset (Excel, virtausmittareiden hallinta) tuotettiin Microsoftin kehittämällä, net framework ohjelmistokomponenttikirjastoon nojaavalla Visual Basic. Net – kielellä.

#### **Toiminta**

Ohjelmiston toiminta ja funktiot on kuvattu tarkemmin kappaleessa 7 Ohjelman toiminnallisuus ja käyttö.

#### **4.2.2 Kokoonpano ja instrumentointi**

Kokoonpano vaiheessa laitteisto purettiin ja osat puhdistettiin sekä tarvittaessa rasvattiin uudelleen. Kaasupistokkeiden liittimet uusittiin 6mm pikaliittimiksi. Pakokäyrä ja -putki irrotettiin systeemistä kääntöä varten ja uuden asennuslevyn myötä käännettiin paikallaan 180 astetta, jolloin pakokaasut voitiin johtaa huoneen vetokaappiin poistoa varten.

Huoneistoon asennettiin sähkökaapille pistorasia, johon kytkettiin 230 VAC jännitesyöttö. Sähkökaapille tilattiin laitokset työpajalta asennuskehikko, johon kaappi kiinnitettiin ja jossa se sijoitettiin sähköpistokkeen lähelle.

Kattilan vastapaino asennettiin paikoilleen ja kiinnitettiin ohjausvaijeriin, jonka jälkeen itse laitteisto siirrettiin uudelle paikalle seinän viereen, sähkökaapin läheisyyteen. Sähkömiehen avustuksella lämmityselementit kytkettiin sähkökaappiin ja järjestelmä saatettiin lämmitysvalmiiksi. Sähkökaapin ohjauskaapelit kytkettiin järjestelmään jännitteenvahvistusyksikön kautta.

Massavirtausmittarit asennettiin asennuslevyllä laitteiston vieressä olevan kaapin sisään ja kaasu putket reititettiin kaapistojen läpi mittareille ja mittarista kattilaan. Poiketen esisuunnittelusta, vanhaa venttiiliyksikköä ei ohitettu vaan yksikön kuivatus- ja sekoituspatruunoita sekä analogiamittareiden virtausinformaatiota päätettiin hyödyntää massavirtamittareiden kanssa. Ennen kaasujen kytkemistä kuivatuspatruuna tyhjennettiin ja sisälle vaihdettiin kuivattu ja puhdistettu kuivatinmateriaali.

Lämpötilamittareiden kaapelit liitettiin NI:n kytkentälaatikkoon vastaaville analogisille kanaville. Massa ja virtausmittareita varten jouduttiin tietokoneeseen hankkimaan sarjaporttilaajennus, jotta kaikki kolme sarjaportti-liitäntää voitiin suorittaa.

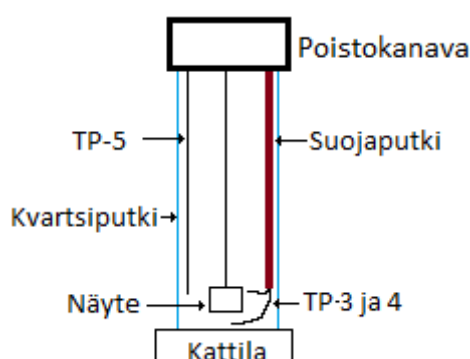
Laitteiston toiminta ja funktiot on kuvattu tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

## 5 LAITTEISTON TOIMINNALLISUUS JA KÄYTTÖ

### 5.1 Lämpötilamittaus ja säätö

Termisessä analyysissä käytettävän mittauslaitteen tulee pystyä luotettavasti ja häiriöttömästi mittaamaan kappaleeseen johdettavan reaktiokaasun lämpötilaa ja/tai kappaleen lämpötilaa.

Viidestä termovaakaan asennetusta termoparista kolme on sijoitettu siten, että ne mittaavat kvartsiputken alaosan oletetun kappaleen tasolla olevan näytetilan kaasuvirtauksen lämpötilaa. Kaksi termoparia määrittää kattilan sisälämpötilan. Näytetilan termoparien (TP) sijoittelu on esitetty kuviossa 5.



KUVIO 5. Termoparien sijoitus kvartsiputkessa.

Koska kvartsiputkessa näytetilassa kulkevan kaasuvirtauksen maksimilämpötilan ei koskaan tulisi nousta yli 850 asteeseen, sijoitettiin sinne K-tyyppiset termoparit (lämpötila-alue n. 0-1200 °C). Uuniin, jossa voidaan virhetilanteesta ja/tai huolimattomasta lämmityksestä johtuen odottaa jopa yli 1000 °C asteen lämpötiloja, oli valmiiksi asennettu, VTT:n toimesta, R-tyyppiset termoparit (lämpötila-alue n. 0-1600 °C).

Kuviossa 5 esitellyllä tavalla järjestetyt termoparit tuodaan yhtä lukuun ottamatta keraamisen suojaputken sisässä näytetilaan, jossa termoparien päät voidaan asetella halutulle etäisyydelle kappaleesta. Viides termopari (TP-5) on rakenteeltaan toisia paksumpi, reagoiden muita hitaammin ympäristön lämpötilavaihteluihin. Kokonsa vuoksi sen mittauspää tuodaan suoraan, ilman erillistä suojausta, näytetilaan.

Uuniin sijoitetut termoparit tuodaan pohjan kautta keraamisten suojaputkien avulla kattilan keski- ja yläosaan.

Uunin (ja kaasuvirran) lämpötilaa kontrolloidaan sähkökaapin syöttämän sähkövirran avulla.

## **5.2 Sähkökaappi**

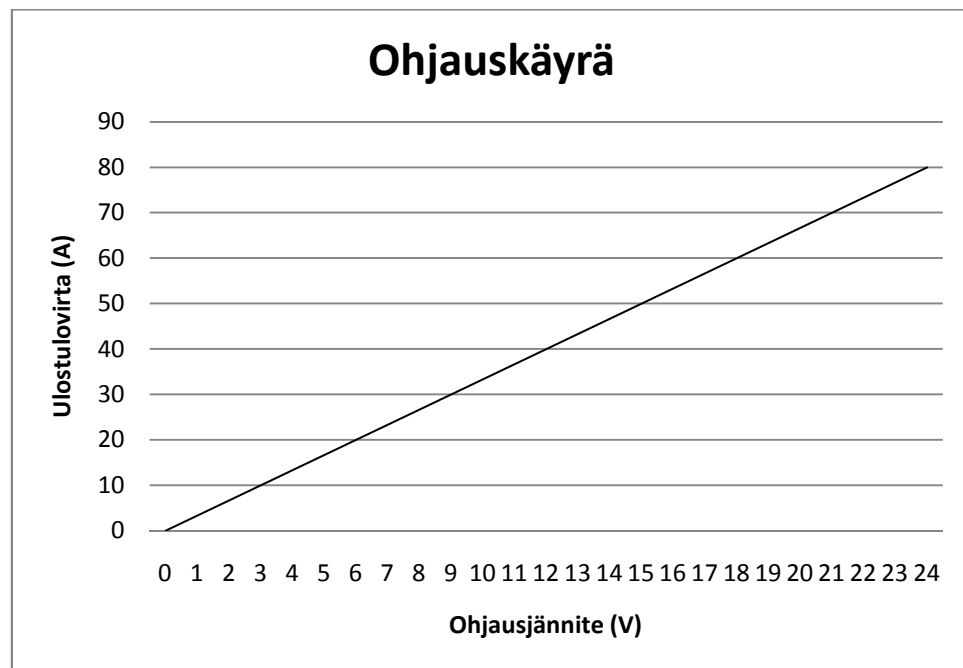
Sähkökaappi syöttää lämmitysvirtaa kattilan lämmitysvastuksille, joiden avulla kattila ja sen läpi kulkeva kaasuvirta lämmitetään. Sähkökaapin syöttämää lämmitysvirtaa voidaan säädellä ohjausjännitteen avulla.

Syöttämällä 0-24 voltia (V) kaapin ohjaukseen voidaan lähtövirtaa vastaavasti säädellä välillä 0-60 ampeeria (A). Koska työssä käytetty kytkentälaatikko SCB-68 kykenee syöttämään ainoastaan 10 V lähtöjännitteenä, ohjausjärjestelmää jatkettiin jännitteenvahvistusyksiköllä. Yksikkö skaalaa sisääntulevan jännitteen kaksinkertaiseksi, jolloin saavutetaan 0-20 V jännitealue joka vastaa kaapin lähdössä 0 – 50 A virta- aluetta (ks. kappale 5.5).

Ohjausjännite on ohjelmallisesti rajoitettu 12 V (40A) koska sähkökaapin sisällä käytetty 16A sulake ja vastaavat laitoksen sähkönsyötön sulakkeet ovat liian pieneksi mitoitettu yli 40 A toiminnalle. Käytettäessä yli 12 V jännitteitä kaapin ohjauksessa lyhennetään merkittävästi sulakkeiden käyttöikää, sillä tällöin äkillisten jännitteiden muutokset on testeissä todettu aiheuttavan sulakkeen (tai sulakkeiden) välittömän palamisen.

Mittausta valmistellessa tulee huomioida jännitteenvahvistusyksikköön sijoitettu vipukytkin, joka kytkettäessä sallii sähkökaapin automaattikäytön.

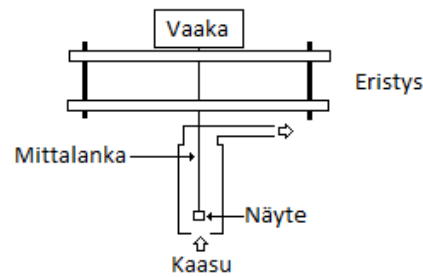
Sähkökaapin ohjauskäyrä on kuvion 6 mukaisesti hyvin lineaarinen.



KUVIO 6. Sähkökaapin lähtövirta ohjausjännitteen funktiona.

### 5.3 Massanmittaus

Termogravimetri määrittää kappaleen massan elektronisen vaa'an avulla. Vaaka on sijoitettu laitteiston korkeimpaan kohtaan ja eristetty mahdolliselta kaasuvirran aiheuttamalta lämpövuodolta. Mitattava kappale sijoitetaan vaa'an pohjassa olevasta mittauskourusta roikkuvaan mittauslankaan, jossa se sijoitetaan kaasuvirtaukseen näytetilaan. Kappaleen sijoituskorkeutta kaasuvirtauksessa säädellään kappaleen ripustuksella, eli tavalla jolla se kytketään mittalankaan (koukku, solmu). Kuviossa 7 on esitetty laitteessa käytetty punnitusperiaate sekä vaa'an lämpöeristys kuumasta kvartsiputkesta. Vaaka on eristetty lämpötilalähteestä sekä styroksesta, jotta ilmaeristyksestä.



KUVIO 7. Vaa'an sijoitusperiaate.

Vaaka on säädetty seuraavasti:

- Jatkuva mittauksen kirjoittaminen sarjaliikenneporttiin
- Automaattinen käynnistyminen jännitteen kytkeytyessä päälle
- Automaattinen taarus käynnistettäessä
- Maksimi mittaustarkkuus (1 mg)

Mittausvaakana käytetään laitteen mukana toimitettua elektronista vaakaa, joka kytkettiin mittausohjelmaan sarjaliikenneportin kautta. Vaa'an luotettavuus tarkistettiin tarkistuspainoilla, jolloin virheeksi saatiin +/- 1 mg, eli sama kuin valmistajan ilmoittama.

## 5.4 Kaasuvirtaus

Kaasuvirtaa säädellään kahdella kaasukohtaisella massavirtausmittarilla, joissa on sisäänrakennettuna sekä mittaus, että säätömahdollisuudet. Mittarit on tehdaskalibroitu joko typen tai ilmaseoksen mittaamiseen. Mittarit on asennettu keskenään rinnakkain sekä sarjaan vanhan venttiilijärjestelmän kanssa, jolloin voidaan hyödyntää vanhan järjestelmän sekoitinta, kuivatinta sekä asennettuja rotametrejä.

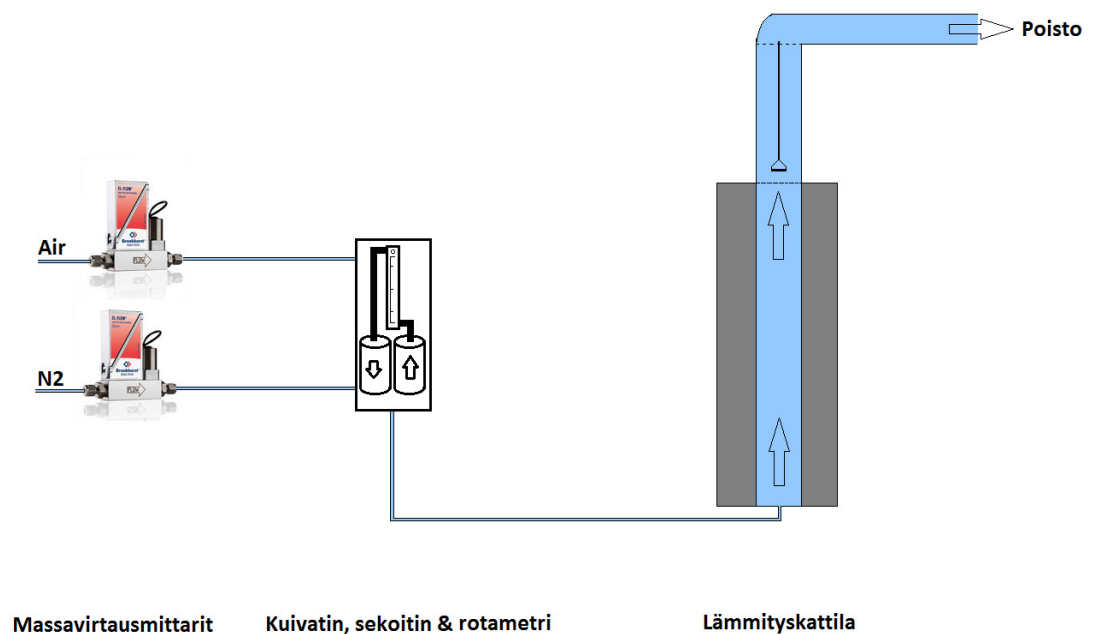


Reaktiokaasut tuodaan laitoksen verkosta seinäliittimen kautta massavirtamittareille, jotka edelleen säätelevät kattilaan menevää virtausta. Ennen kaasuvirtauksen lämmittämistä se kuivataan ohjaamalla virtaus kuivatuskennon läpi.

Kuivatuskenno on metallisylinteri, täytettynä kuivatusaineella (silika gel) jonka läpi kaasuvirta ohjataan. Patruunan kuivatin poistaa kaasuvirtauksesta kosteuden. Kuiva-  
tin valittiin siten, ettei se reagoi kaasun kanssa. Kuivausaineen valinnassa on huolehdittava, ettei kaasuvirran mukana kulkeudu kattilaan mitään sellaista mikä voisi vääristää mittaustuloksia. Patruunan kaasuvirtausaukot sylinterin sisällä suojattiin metalliverkolla jonka silmäkoko on pienempi kuin kuivausaineen raekoko.

Massavirtausmittareita ei ole sisäisen PID-ohjaimen parametreja lukuun ottamatta erikseen säädetty. Mittarilukemien luku ja asetus hoidetaan ohjelmallisesti.

Kuviossa 8 on esitettyä laitteiston virtauskaavio.



KUVIO 8. Kaasuvirtaus laitteessa

## 5.5 Jännitteenvahvistusyksikkö

National Instrumentsin SCB-68 – kytkentälaatikon jännitteellistä lähtöä vahvistamaan hankittiin jännitteenvahvistusyksikkö, joka tuplaa laatikkoon syötetyn jännitteen (aina 24 V asti).

SCB-86 kytkentäelementin maksimi jännitelähtö on n. 10 V, jolla (kuvion 6 mukaisesti) saavutetaan ainoastaan 30 - 35 A lähtövirta eli n. 42 % sähkökaapin kapasiteetista. Liittämällä vahvistusyksikkö kytkentälaatikon jännitelähtöön saavutetaan maksimiohjaukseksi n. 20 V, jolloin sähkökaapista maksimi lähtövirta on n. 65 A eli n. 83 % sähkökaapin kapasiteetista (ks. kuvio 6).

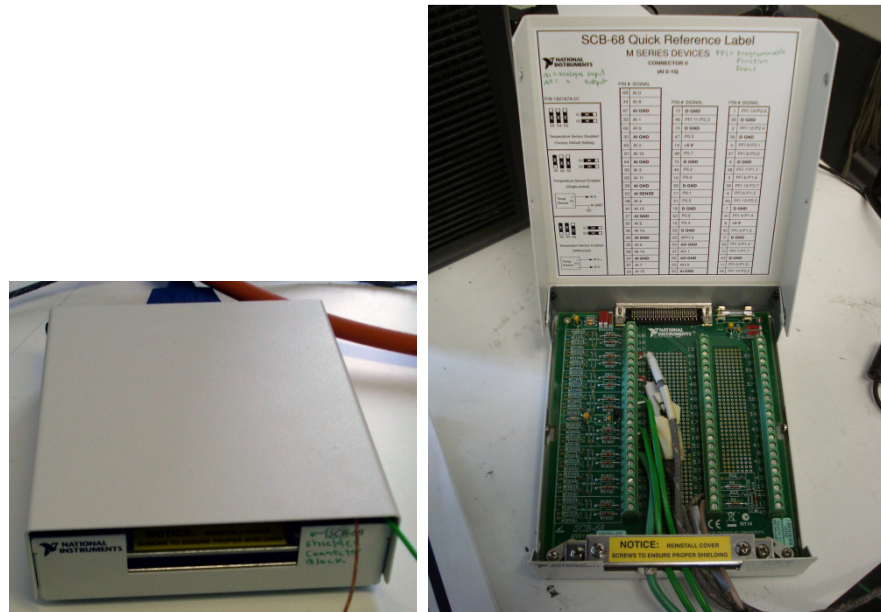
Vahvistusyksikkö tilattiin laitoksen sisäiseltä elektroniikan osastolta, jossa yksikkö suunniteltiin ja kasattiin.

## 5.6 Kytkentäblokki

Analogisella kytkennällä olevat instrumentit kytkettiin ohjelmistoon PCI-väylään kytketyn suojatun kytkentäblokin kautta. Kytkentäblokkina käytettiin National Instrumentsin SCB-68 – kytkentärasiaa, joka oli yhdistetty tietokoneen PCI-väylässä olevaan NI PCI-6601 – korttilaajennukseen. Kuviossa 9 on esitettyä anturien kytkennässä käytetty kytkentärasia.

Kytkentärasiaassa on 8 differentiaalista ja 16 yksittäistä kanavaa, joihin anturit voidaan kytkeä. Rasiasta löytyy myös kolme lähtökavanaa  $\pm 10$  V. jännitealueella. Blokin kapasiteetista hyödynnettiin viittä differentiaalista tuloa ja yhtä, kelluvaa, lähtöä.

Anturien kytkeytyminen liittämiin ja analogia kanaviin on esitetty liitteessä 2.



KUVIO 9. SCB-68, Shielded Connector Block

## 6 OHJELMAN TOIMINNALLISUUS JA KÄYTTÖ

### 6.1 Toiminnallisuus

#### 6.1.1 Perusrakenne

Ohjelma tuotettiin while-toistorakenteiseksi, joka huolehtii siitä, että ohjelmaa ja sen komponentteja päivitetään jatkuvasti halutulla aikavälillä (tyypillisesti: 0.1, 0.5, 1 s. välein). Päivitysväliä säätämällä voidaan mm. säätää prosessorikuormaa ja näytteenottoväliä.

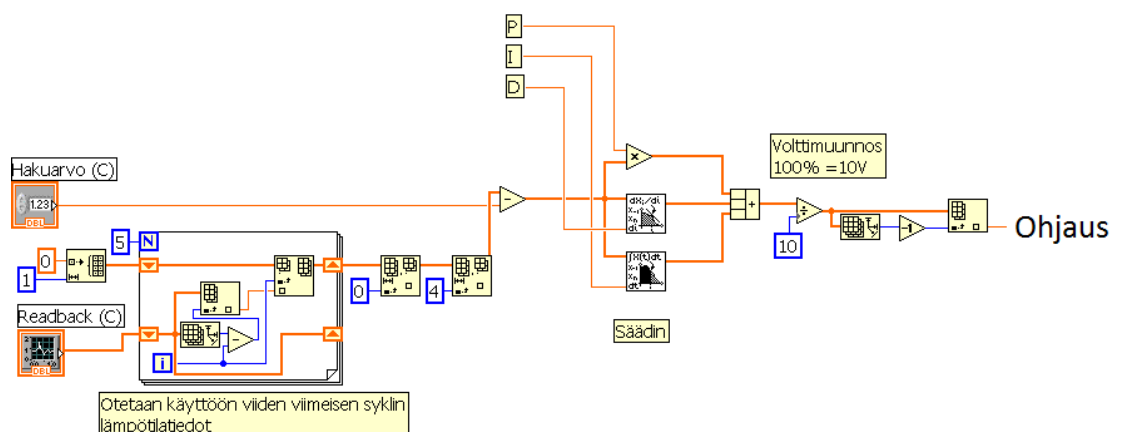
Ohjelman osat on jaettu erillisiin toistorakenteisiin ohjelman selkeyttämiseksi ja laskutoimitusten nopeuttamiseksi. Ohjelma koostuu 5 erillisestä while-rakenteesta, joista jokainen hoitaa jotain ohjelman osa-aluetta.

While-toimintarakenteiden tehtävät:

1. Virtausmittaus ja venttiilin ohjaus
2. Datat kerääminen
3. Lämmitysohjelma, luonti ja hallinta
4. Käyttöliittymä, nappilogiikat ja muuttujat
5. Tulokset-kuvaajan säädöt

### 6.1.2 Säädin

Säädin rakennettiin omaksi aliohjelmakseen säätämään kytkentälaatikon jännitelähtöä ja näin sähkökaapin syöttämää sähkövirran määrää. Säädin on tyypiltään PID-säädin jonka avulla lämpötilan säätö voidaan automatisoida. Säädin itsessään sisältää myös nolla - ja kiinteä ohjaus – parametrit. Säätimen perusrakenne (yksinkertaistettuna) on esitetty kuviossa 11.



KUVIO 10. Säätimen yksinkertaistettu ohjelmarakenne

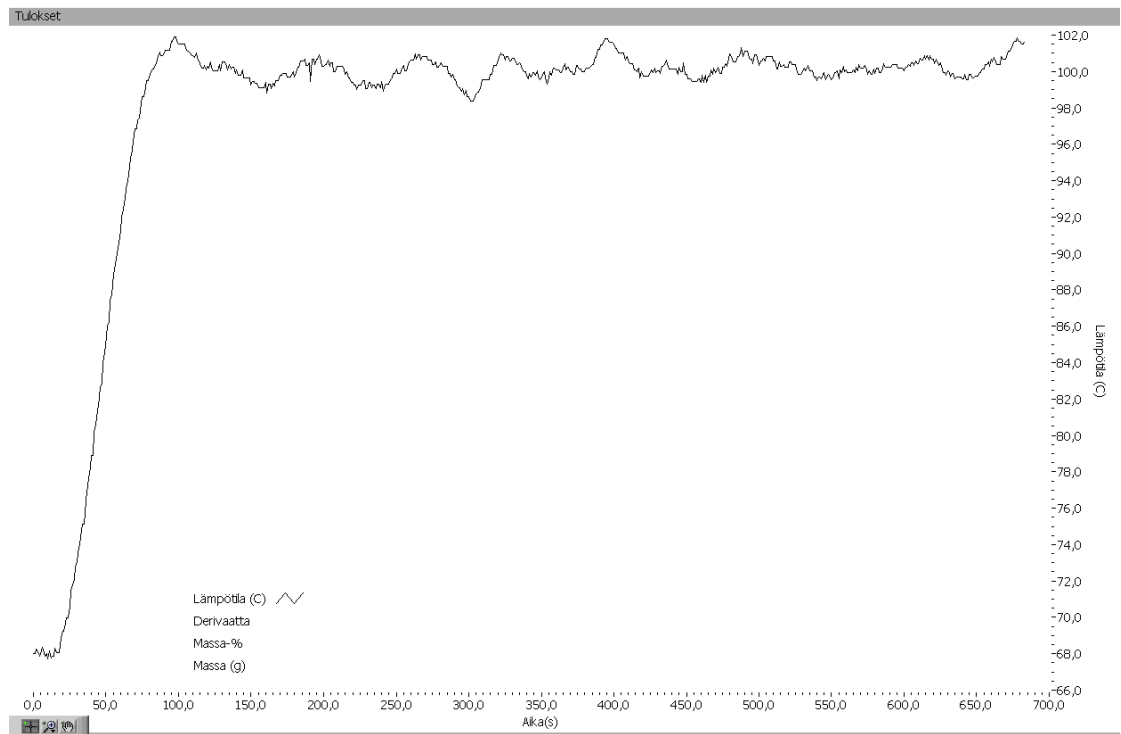
Nollatoiminnolla voidaan säädin ajaa minimaalisin kytkennöin nollatilaan ja näin resetoida jännitelähtö. Toimintoa käytetäänkin mittausajon jälkeisessä nollauksessa ja toimintoa voidaan soveltaa käytettäväksi myös vikatilanteissa.

Ohjelmoija voi halutessaan asettaa myös kiinteän ohjausparametrin jolla ohitetaan säätimen laskenta-algoritmi (P, I, ja D arvot) syöttämällä lähtöön vaihtumaton ohjausarvo. Kiinteä parametri määritetään prosenttimuodossa (0 – 100 %), jolloin ohjaukseksi saadaan arvosta riippuen 0 – 6 V. Jännitteenvahvistusyksikön muunnoksen jälkeen saadaan jännitealueeksi 0 - 12 V. Kiinteän ajon parametria voidaan hyödyntää jatkuvan ajon moodissa, ohjausarvo asetuksella.

Säätimen P, I ja D-parametreille löytyy sekä lämmitysvaiheen, että pitovaiheen parametrit, joiden käyttöön voidaan vaikuttaa mode-valitsimella (ks. Liite 6). Arvoilla pyritään painottamaan vaiheiden vaatimia eroja ohjauksessa, jolloin nousukäyrät eroavat toisistaan merkittävästi. Säätimen viritys näille kahdelle eri vaiheelle, käyttäen vain yksiä parametreja, osoittautui liian haasteelliseksi, joten pito – ja lämmitysvaiheen PID-arvot viritettiin erikseen.

Lämmitys- ja pitovaiheessa sallitaan ainoastaan 5 % ylitys tavoitelämpötilasta mutta jotta lämpötila kyettäisiin pitämään tavoitearvossa (perustuen laitteella ja työstetyllä ohjelmistolla suoritettuihin polttokokeisiin) on sähkökaapin syötettävä vähintään 15 – 20 A sähkövirtaa lämmityselementille, eli viidenkymmenen prosentin (6 V) jänniteohjaus. Alle 200 °C ajossa ei lämpötilan tasaantumista tavoitearvoon voida taata mikäli nousuvaiheessakin ohjaus on 50 % tavoitelämpötilassa. Tällöin lämpötilaylitys voi olla jopa 10 – 20 % jollaista ei tieteellisessä tutkimuksessa voida sallia. Ongelma ratkaistiin jakamalla ohjausparametrit kahteen osaan ja virittämällä ne lämmitysprofiilin mukaiseksi. Näin muodostettiin aliviritetty, hitaasti reagoiva, ja yliviritetty, nopeasti reagoivan, säädin profiili.

Kuviossa 11 on mittausohjelman tulostuskuvaajan esittämänä, säädön lämpötilavaste hakuarvon ollessa 100 °C. Pitovaiheen virhe on n. +/- 2 °C eli 2 % pitolämpötilasta.



KUVIO 11. Lämpötilan nousuprofiili

Säädin pyrkii myös ennustamaan tulevan lämpötilaylityksen tarkkailemalla kymmenen sekunnin muutosikkunaa, eli lämpötilan muutosta 10 s. aikavälillä. Perustuen lämpötilan muutosvauhtiin suoritetaan hakuarvolle painotus, jolloin säädin tulkitsee hakuarvon joko pienemmäksi tai suuremmaksi, säätäen jänniteohjaustaan sen mukaisesti. Painotusarvon määrittäminen voidaan ilmaista lausekkeella:

$$T_{\text{painotettu}} = T_{sp} - (T_n - T_{n-10}) \quad (2.1)$$

, jossa  $T_{sp}$  = hakuarvo ja  $n = 1, 2, 3, \dots$  (mittausindeksi).

Nousun ollessa nopea säädin pienentää hakuarvoa, jolloin hakuarvoa lähestyttäessä ohjaus katkaistaan jopa kymmeniä asteita aikaisemmin jättäen tilaa lämmönsiirtymisen aiheuttamalle viiveelle.

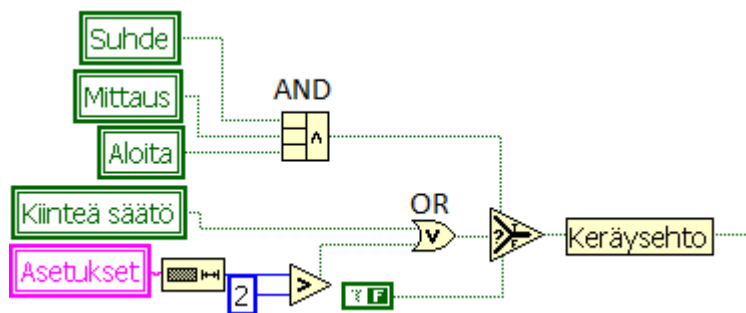
Liitteessä 6. on esitetty PID-säätimen käyttöliittymä jossa nähtävissä niin ohjauskäyrät kuin ohjausparametrit sekä lämpötilan painotus.

### 6.1.3 Datan keruu

Ohjelma ylläpitää massalle ja lämpötilalle kahta erillistä mittausaulukkoa, joita hyödynnetään jatkuvan mittauksen - ja mittausdatan keräystaulukoiden hallinnassa.

Ensimmäiseen, reaaliaikaisen datan taulukkoon kerätään mittausdata ohjelman käynnistyksestä sen pysäytykseen. Taulukon tarkoituksena on toimia yleisenä datavarastona, josta voidaan halutessaan lukea reaaliaikaista tietoa mittauksen kulusta. Sekä massan että lämpötilan taulukkoon vaikuttavat mahdolliset kompensoinnit ja lähdevalinnat.

Toinen taulukko toimii mittausdatan välivarastona, jonne kerätään vain testiajon aikainen muokkaamaton informaatio. Taulukon tietoja käytetään testiajon päätteeksi tulosten esityksessä ja tallennuksessa. Taulukon tietoja ei muokata vaan lopullisessa tiedostoon tallennuksessa mittausdata tallennetaan kaikilta antureilta ainoastaan kevyesti suodatettuna. Massan ja lämpötilamittauksen suodatuksesta enemmän vastaavissa kappaleissa (6.1.4 ja 6.1.5).



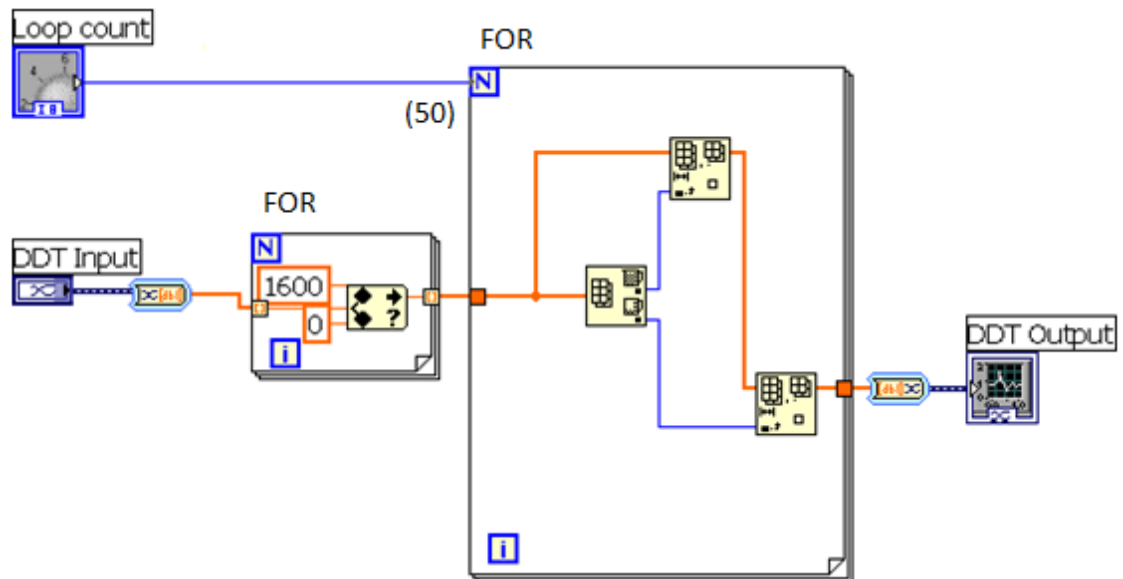
KUVIO 12. Keräysehto

Mittausdataa kerätään taulukkoon ainoastaan lämmitysohjelman aikana, keräysehdon (kuvio 12) mukaisesti. Datan keruu toteutetaan vain jos lämmitysohjelma on käynnissä, esiaskel- vaihe on suoritettu ja kaasuvirtauksen asetukset ovat kunnossa. Mikäli keräysehto ei täyty, nollataan mittausaulukko tulevien mittausvirheiden minimoimiseksi.

### 6.1.4 Lämpötilamittaus

Mittausohjelma kerää informaatiota viideltä eri anturilta, eri kohdista uunia. Näin saadaan aina kokonaisvaltainen kuva testausympäristöstä ja näytetilan lämpötilasta. Kaasuvirtauksen pyörteiden, viileiden taskujen sekä vaihtelevan eristyksen vuoksi lämpötilassa voi esiintyä useiden asteiden vaihtelua eri mittapisteissä. Mittaamalla useista kohdista, useilla mittareilla voidaan luotettavasti laskea ympäristölämpötilan keskiarvo näytetilassa.

Lämpötilamittaus luetaan termopareista, joita laitteessa on sekä K ja R-tyyppisiä. K-tyypin termoparit ovat sijoitettuna näytetilaan, oletetun kappaleen sijoituskorkeudelle, ja R-tyyppiset kattilaan, käämien läheisyyteen. Mittausdataa käsitellessä hyödynnetään K-tyyppisten anturien mittaamaa informaatiota.



KUVIO 13. Käyrän tasaaminen

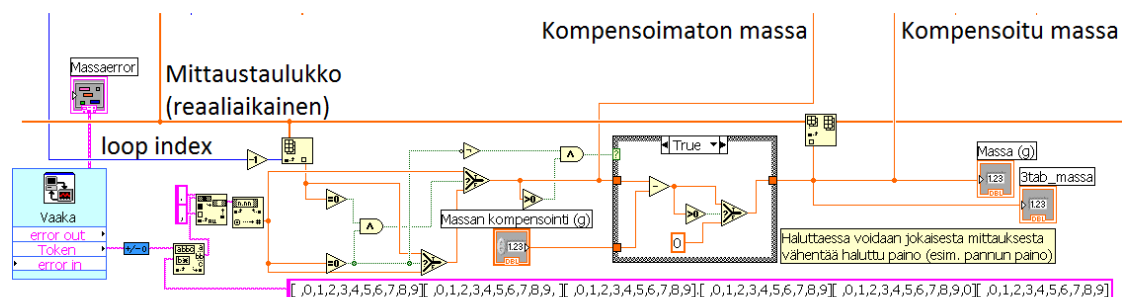
Lämpötilamittauksessa käytetään kevyttä suodatusta, jolloin jokaisen anturin tasasekunteinä luettu arvo muodostetaan sadan kerätyn mittauspisteen suodatettuna



keskiarvona. Mittauspisteiden joukolle suoritetaan käyrän tasoitus poistamalla 50 huippua (minimi ja maksimi) sekä rajoittamalla pisteen arvo välille  $0 < T_p < 1600$ . Jäljelle jääneestä pistejoukosta muodostetaan keskiarvoistamalla yksittäinen lämpötila-arvo. Käyrän tasoitus suoritetaan Kuviossa 13 esitetyllä tavalla. Suodattamalla käyrästä huiput ja rajoittamalla käyrän arvot halutulle välille, pyritään suodatuksella eliminoida lämpöelementin magneettikentän aiheuttama virhe.

### 6.1.5 Massan mittaus

Ajonaikaiset massan muutokset kerätään elektroniselta laboratoriovaa'alta tietokoneen sarjaliikenneportin kautta. Punnittavan kappaleen massalukema muodostetaan vaa'asta lukemalla, tasasekunnein, vaa'an antama massa-arvo.



KUVIO 14. Vaa'an mittausdatan muokkaaminen

Massamittauksessa ei käytetä mittausohjelman sisäistä suodatusta mutta vaa'an lukemaa voidaan muokata asettamalla nk. kompensointi arvo. Kuvion 14 mukaisesti kompensointi-arvo vähennetään luetusta arvosta, jolloin voidaan huomioida mm. ripustusten ja/tai astian paino. Vaa'an lukemaa tutkitaan mahdollisten laitetietojen varalta, jotka esiintyvät string – double -datatyyppimuunnoksen jälkeen nolla-arvoina.

Vaaka syöttää ajoittain lähtöönsä laitetietoja asetuksistaan huolimatta, minkä vuoksi mittausohjelma tulkitsee jokaisen vaa'an syöttämän nolla-arvon laitetiedoksi ja kopioi edellisen kierroksen mittaustuloksen lähtöönsä. Ajoa edeltävien vaa'an taarauksien vuoksi massapisteen arvo voidaan nollata vain käynnistämällä ohjelman mittausrakenne uudestaan.

Vaa'an ja lämpötilamittauksen mittausrakenne voidaan käynnistää uudestaan etusivulla kuvaajan alapuolella olevalla "Alusta" – napilla.

### **6.1.6 Virtausmittaus**

Massavirtaussäätimiä käytetään ohjelmallisesti laitevalmistajan FlowB32.DLL-rajapinnan kautta. Mittausohjelma sekä lukee mittaustiedon, että konfiguroi säätimet ja portit ohjelman käynnistyessä. Säätimet käsittelevät informaatiota 16-bittisenä integer arvona (välillä 0 – 32 000, jossa 32000 vastaa 100 % joko kalibroidusta mittausarvosta tai venttiilin aukeamasta, parametrasta riippuen).

Dll-yhteys laitteisiin hoidetaan Termovaaka.dll kautta jolloin voidaan parantaa ohjelman toimintavarmuutta. Työssä tuotettua ohjelmaa ei käännetty suoritettavaan \*.exe-muotoon vaan ohjelma jätettiin suoritettavaksi LabView-ympäristössä. Kehitysympäristössä ajettuna ei Dll yhteyden toimivuutta FlowB32.dll kanssa voitu taata, liittyen kehitysympäristön tapaan hoitaa ohjelmarekisteri ja yhteyskutsut eri komponenttien välillä, joten funktiokutsuille luotiin .Net tulkki Termovaaka.dll:n sisään.

## **6.2 Käyttöliittymä**

### **6.2.1 Rakenne**

Mittausohjelman käyttöliittymä pyrittiin rakentamaan intuitiiviseksi käyttää sekä selkeäksi, kattavaksi kokonaisuudeksi. Käyttöliittymä jaettiin välilehtipohjalle kolmeen eri välilehteen: Ohjelma, Tulokset ja Asetukset. Jokainen välilehti on omalla

tavallaan osioitu, jolloin toisiinsa liittyvät kontrollit ja indikaattorit ovat selkeästi esillä. Välilehtien koko on sama, eli LabView:n piirtoalueen näytölle mahtuvan osuuden koko.

Ohjelma-välilehti (ks. Liite 7) on ensimmäinen käyttäjälle esiteltävä välilehti ja kattaa ohjelman käytössä tarvittavat kontrollit ja indikaattorit. Se on jaettu kahteen osaan sijoittamalla muokattavat sekä esittävät elementit toisistaan erillisille osioille.

Liitteen 7 mukaisesti ikkunan vasemman puoleiselle osiolle on sijoitettuna muokattavat kontrollit, liittyen sekä mittauksen esitietoihin, että mittausohjelman parametreihin. Vasemman puolen ollessa käyttäjän hallitsema osa, on oikealle puoliskolle keskitetty reaaliaikadatan esitys. Niin ikään liitteen 7 mukaisesti, oikeapuoleinen palsta käsittää lämpötilan ja massan muutosta esittävän kuvaajan sekä indikaattorikenttiä, joilla esitetään desimaaliarvoina viimeisempien mittapisteiden arvoja sekä mittausohjelman kulkuindikaattorit. Palstoituksen lisäksi vasemman puoleinen palsta on jaettu kahteen osioon esitietojen ja ohjelmaparametrien kesken.

Tulokset-välilehti (ks. Liite 8) on nimensä mukaisesti tarkoitettu ensisijaisesti mittaus-tulosten käsittelyyn. Välilehteä hallitsee, sen lähes kokonaan kattava, tulokuvaaja, jossa mittauksen päätteeksi tulostuu graafinen kuvaaja. Kuvaajan lisäksi välilehdeltä löytyvät kuvaajan piirron hallintaan ja käyrien esitykseen liittyvät kontrollit, sekä tulostuksen ja tallennuksen kontrollit. Välilehti on osioitu siten, että kontrollit ovat sijoittuneet mahdollisimman ylös, ohueksi nauhaksi jotta tulokuvaajalle olisi mahdollisimman paljon tilaa.

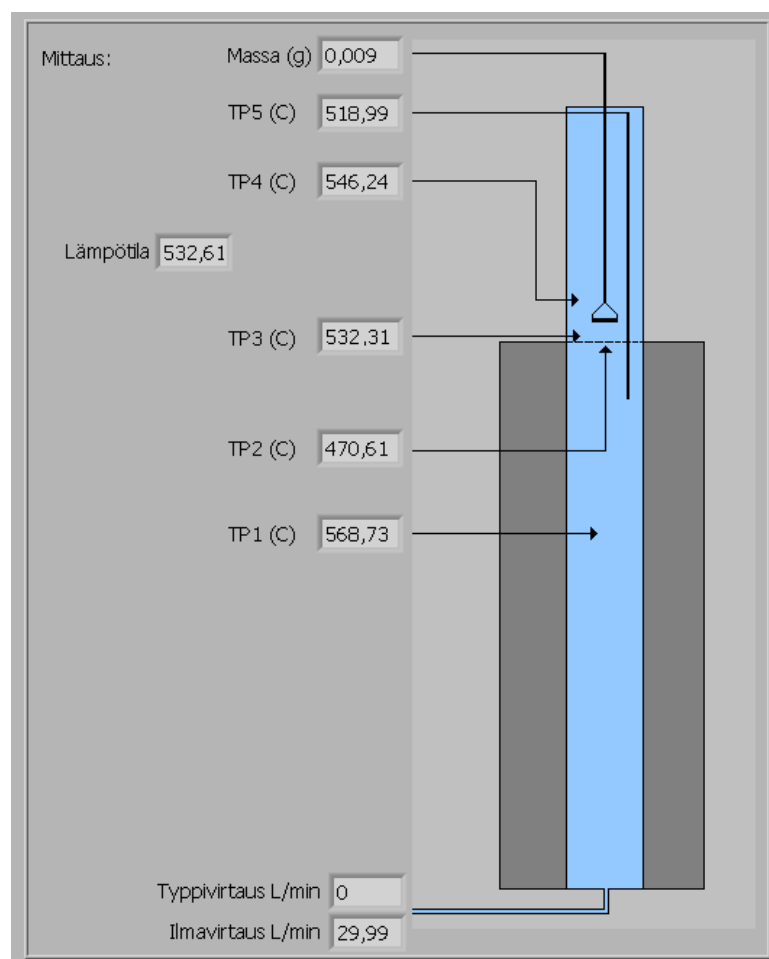
Asetukset-välilehti (ks. Liite 9) pitää sisällään mittauksen valmistelussa tarpeettomat asetuskontrollit sekä anturikohtaisen informaation esittävän prosessikuvaajan. Välilehdellä olevat kontrollit liittyvät syvempiin asetuksiin, kuten termoparien lämmitysrajoihin sekä turvarajoihin. Välilehdelle on myös sijoitettu puoli lehteä kattava kuvaaja, josta voidaan lukea jokaisen kytketyn anturin silloinen lukema. Indikaattorit on sijoitettu siten, että yhdessä kuvan kanssa helpottavat ymmärtämään antureiden sijoittumista järjestelmässä (ks. kuvio 15).

### 6.2.2 Ajonaikainen informaatio

Mittauksen edistyessä käyttäjä voi tarkastella ohjelman indikaattoreiden avulla mittauksen kulkua ja prosessin tilaa. Pääosin informaatio esitellään Ohjelma-välilehden oikeanpuoleisella palstalla, jonne on sijoitettuna sekä kuvaaja, että muutamia ko. kierroksen mittaukseen pohjautuvia indikaattoreita.

Välilehden indikaattorien avulla käyttäjälle esitellään niin massan muutos, sekä aloituspaino kuin myös lämpötilan laskennallisia arvoja (haluttu keskiarvo, sekä lämpötilan muutos viimeisen minuutin aikana). Välilehdelle sijoitetut indikaattorit ovat hyödyllisiä mittauksen seuraamisen kannalta.

Ohjelman tärkeimpiä indikaattoreita on Tulokset-välilehden kuvaaja, jonka avulla käyttäjälle esitellään mitatun datan muutokset ja siitä lasketut arvot (prosenttipohjainen massan muutos sekä massan derivaatta).



KUVIO 15. Anturikohtainen prosessinseuranta

Käyttäjä voi myös seurata anturikohtaista mittausinformaatiota kolmannen välilehden (Asetukset) kuvaan liitettyjen indikaattorien avulla. Kuvion 15 mukaisesti indikaattorit esittävät viimeisimmän mittauksensa kahden desimaalin tarkkuudella.

Mikäli käyttäjän tarvitsee tehdä säätöjä ja/tai kyetä monitoroimaan alemman tason blokkien toimintaa, on kolmannelle välilehdelle koottu painikkeet tärkeimpien aliohjelmien aukaisuun, kuten esim. PID-säätimen ajonaikainen ikkuna (Liite 6). Säätimen lisäksi käyttäjä voi aukaista etupaneelin myös suodattimesta ja derivaatan muodostavasta aliohjelmasta (ks. Paneelivaihtoehdot Liite 9, vas. alakulma).

### **6.2.3 Kuvaajat**

Ohjelma – ja tulossivulla sijaitsevat kuvaajat ovat muokattavissa. Käyttäjä voi muokata kuvaajia säätämällä akseleiden maksimi ja minimipistettä, jolloin voidaan käyrän muutosta halutulla alueella tarkastella paremmin.

Tulokset-kuvaajassa on käyttäjän mahdollista hyödyntää LabView-ohjelman ominaisuuksia käyttämällä työkalupaletin zoom - ja pan toimintoja. Työkalupaletti on sijoitettu kuvaajan vasempaan alanurkkaan (ks. liite 8)

### **6.2.4 Ohjelmalaajennukset**

LabView-ohjelmisto käyttää oman kehitysympäristönsä lisäksi Microsoftin .Net komponenttia. Mittausohjelman tueksi kehitetyn DLL-tiedoston kautta voidaan hyödyntää sekä MS Excel 2007 tuloksien tallennuksessa että massavirtausmittareiden säätöihin ja lukemiseen liittyviä toimintoja.

## 6.3 Testausympäristö

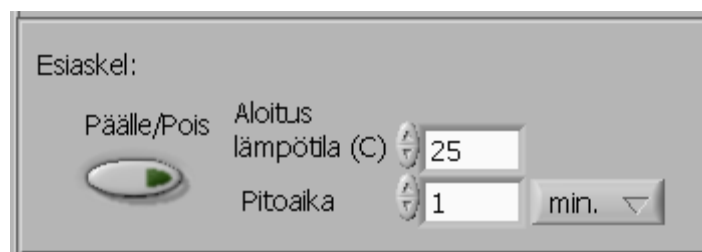
### 6.3.1 Mittauksen esitiedot

Mittaussovellukseen voidaan syöttää esitietoja, sekä huomioita polttokokeesta ja sen luonteesta. Nämä tiedot ovat täysin vapaaehtoisia, eikä käyttäjältä vaadita näitä tietoja mittauksen suorittamiseksi. Tietoja käytetään myöhemmin mittausdataa tallettaessa tai tulostettaessa.

Käyttäjän täytettäväksi on jätetty kolme kenttää: Nimi, Näyte ja Huomioitavaa. Kirjoitusmerkkien määrää kentissä ei ole rajoitettu ja syötettyä tekstiä voidaan täydentää myös mittauksen aikana (ks. liite 7).

### 6.3.2 Esiaskelen käyttö

Lämmitysohjelmaa ajettaessa, on käyttäjällä mahdollisuus ottaa käyttöön nk. esiaskel, jossa kaasuvirta esilämmitetään haluttuun lämpötilaan. Esiaskel on ohjelma-ajon mukaisesti kaksi vaiheinen, sisältäen sekä lämmitys-, että pitovaiheen eikä sen aikana tallenneta mittausdataa.



KUVIO 16. Esiaskelen hallintapaneeli

Kuvio 16 mukaisesti esiaskeleen asetusarvoina käytetään lämpötila- ja aika-arvoa. Esilämmitysvaiheessa voidaan mm. mittauslaitteiston rakenteet lämmittää, jolloin ympäristötekijöiden vaikutus mittaukselle pienenee. Useimmissa testiajoissa on myös tarpeellista ajaa järjestelmä vakaaseen aloituslämpötilaan ennen kappaleen asettamista ja varsinaisen testin aloittamista.

### **6.3.3 Mittausohjelman luonti**

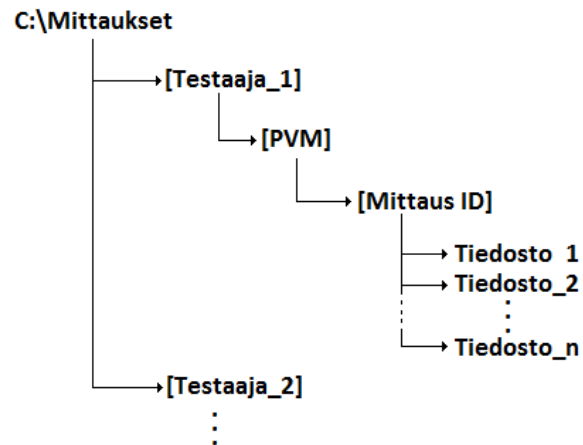
Ohjelma on toteutettu siten, että käyttäjän tulee ohjelmoida lämmitysohjelma ennen mittauksen aloittamista. Lämmitysohjelma alustetaan, joko porrasmaisesti tai jatkuvana. Porrasmaisesti alustettuun ohjelmaan määritetään haluttu määrä lämmitysakselmia, joissa on asetettuna haluttu lämpötila, sekä pitoaika. Jatkuvassa ohjelmassa syötetään haluttu lämmitys- (0 – 800 °C) tai ohjausarvo (0 - 100 %), jonka mukaisesti lämmitysprosessia ohjataan.

## **6.4 Tulosten hallinta**

### **6.4.1 Tulosten tallennus ja arkistointi**

Tulosten arkistoinnissa ohjelma hyödyntää erittäin yksinkertaista kansipohjaista tietokantarakennetta. Rakennetta suunniteltaessa pohdittiin mahdollisia tietokantarakenteita (Access, SQL) mutta lopulta tietokanta toteutettiin kansipohjaisena, sen yksinkertaisuuden ja helpon hallittavuuden vuoksi. Tietokannan käyttö ei vaadi erityisiä ohjelmia tai kykyjä, eikä näin ollen vaadi koulutusta käyttäjiltä.

Tietokanta sijaitsee tietokoneen C-aseman juuressa kansiossa 'Mittaukset.' Juurikansio on määritetty kiinteänä muuttujana ohjelmassa eikä näin ole käyttäjän määritettävissä. Mittausinformaatio tallennetaan tietokantaan perustuen testaajan nimeen, päivämäärään sekä mittauksen tunnisteeseen. Näiden käyttäjän määrittämien tiedostojen pohjalta luodaan kansiopuu kuviossa 17 esitetyllä tavalla.



KUVIO 17. Kansiopohjaisen tietokannan rakenne

Jokaiselle mittaukselle luotuun kansioon tallentuvat sekä mittauksia erillisinä csv-tiedostoina sekä kuvaaja ja tulostamisessa käytetty otsikkosivu tekstitiedostona. Mittauksen päätteeksi kansioon tallennetaan yhteensä 13 eri tiedostoa.

#### 6.4.2 Excel dokumentointi

CSV ja tekstitiedostojen ohella mittauksien tulokset tallennetaan myös Excel-dokumenttina. LabView – ohjelman tueksi kirjoitettiin dll-tiedosto, joka hyödyntää Office paketin ohjelmistorajapintaa Excel dokumentin tuotannossa.

Dokumentti tuotetaan syötetyistä esitiedoista, sekä mittausdatasta. Excel-dokumentti luodaan aina mittauksen päätteeksi tietokantarakenteeseen mittauksen kansioon. Dokumentti on myös mahdollisuus luoda käyttämällä 3.välilehden ”Tallenna”-nappia (ks. liite 9). Mikäli käyttäjä haluaa tallentaa painikkeen kautta erillisen kopion, avataan dokumentti tietokoneen näytölle käyttäjän hyväksyttäväksi.



### 6.4.3 Tulostaminen

Mittauksen päätteeksi voidaan tulostaa mittausajon kuvaaja. Kuvaajaan lisäksi luodaan otsikkosivu, jossa näkyy käyttäjän mittaukselle syöttämä informaatio (testaaja, tunniste, huomioitavaa, kaasujen suhteet ja virtaus), sekä sivulle tulostuvat myös mittausohjelma sekä datasta poimittuja maksimi- ja minimiarvoja.

### 6.4.4 HTML-tallennus

Excel-työkirjan ja suoran tulostamisen lisäksi mittausdata voidaan tallentaa HTML-formaatissa, jolloin käyttäjän polkuun tallennetaan mittausajon dokumentointi. Verkkodokumentti on identtinen tulostettavan kanssa, käsittäen sekä saman otsikkosivun, että kuvaajan.

## 6.5 Virhetilanteiden hallinta ja turvallisuus

Ohjelman osat jossa virhetilanteet ovat mahdollisia, ovat toteutettu siten, että mahdollinen virhetilanne aiheuttaa ainoastaan silloisen käytetyn arvon nollatutumisen. Näin, mm. massan mittauksessa, jossa vaaka saattaa siirtyä virhetilaan virtapiikin jälkeen ja palauttaa tällöin ainoastaan nollatuloksen.

DII – tiedoston sisältämät funktiot käyttävät kaikki try-catch rakenteen, joka kasvattaa huomattavasti ohjelman virheensietokykyä. Rakenteen vuoksi äkilliset ja ennalta arvaamattomat virheet eivät aiheuta ohjelman kaatumista ja datan menetystä.

Ohjelman osat, joissa virheklustereiden käyttö on mahdollista, on kytketty omiin virheindikaattoreihin.

Sähköiskujen varalta, ovat kaikki jännite – ja virtalähteet sekä elektroniset komponentit suojattu koteloimalla. Ohjausyksikkö on suljettu ja varmistettu ruuvikiinnityksellä vahinkojen minimoimiseksi.

## 7 TULOKSET

### 7.1 Toiminnallisuus

Valmistuessaan termovaaka täytti kaikki suunnitteluvaiheen ominaisuudet, sekä laajensi osittain joitain kohtia.

Esisuunnitteluvaiheessa käsitellyt tavoitteet laitteen toiminnalle ja käytettävyydelle saavutettiin. Lopullisesta laitekokonaisuudesta tuli ohjelmoitavissa oleva, helposti hallittava mittaussolu. Laitteisto mittaa kaasuvirtauksen lämpötilaa useilla antureilla ja muodostaa lämpötila-arvon yhden tai useamman termoparin mittaustiedon perusteella.

Koska on hyvin vaikea tarkasti arvioida tulevien mittausten laatu ja tavoitteet, on lämpötilan mittaus ja säätö jätetty osittain avoimeksi jotta käyttäjä voi säätää keskiarvoistusprosessit ja säätimen toiminnan mieleisekseen. Näistä esimerkkinä mm. kaasuvirtauksen kalibrointikerroin, mikäli kaasun syöttöön vaihdetaan kalibroinnista poikkeavia kaasuja sekä PID-säätimen paneeli. Laitteiston opetuskäyttö on huomioitu toimivien säätöparametrien haussa ja ohjelman asetukset on perusarvoiltaan säädetty peruskäytössä toimiviksi, minimoiden laitteen käyttöönottoon liittyvää koulutusta ja ohjeistusta.

Suunnitelmat laitteen toiminnasta ja käytössä olevista ohjelmallisista funktioista muuttuivat osittain sen valmistumisen myötä. Radikaalein muutos laitteistoon suoritettiin hankkimalla yhden sijasta kaksi massavirtausmittaria joiden avulla toteutettiin kaasuvirtauksen suhdesäätö. Ohjelmistollisesti muutokset olivat laajuudeltaan pieniä ja koskivat vain pieniä muutoksia aliohjelmien suorituksessa. Ohjelmistollisesti laitteistoa laajennettiin käsittämään liukuva keskiarvoistus, tietokantatallennus ja valittavissa oleva lämpötilakeskiarvo.

Tutkimuskäyttöä ajatellen ohjelmaan jätettiin tarpeeksi alemman tason parametrisäätöjä jotta ohjelmistoa voidaan käyttää vaihtelevissa mittauksissa. Opetuskäyttöön vuoksi ohjelmaan ei tarvitse syöttää lämmityksen lisäksi muita parametreja, helpottaen ohjeistuksen tekoa ja itse laitteen käyttöä. Käyttäjälle esitetäänkin pel-

kistetty ohjelma, jonka käyttöliittymän kautta hän kykenee automatisoimaan mittauksen ja tarvittaessa säätämään ohjausarvoa sekä pitolämpötilaa käsin.

Laitteiston käyttöön ja tulosten esitykseen liittyviä ongelmia tarkastellaan tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

## 7.2 Ongelmat

### 7.2.1 Ohjelmistolliset ongelmat

#### Derivaatta

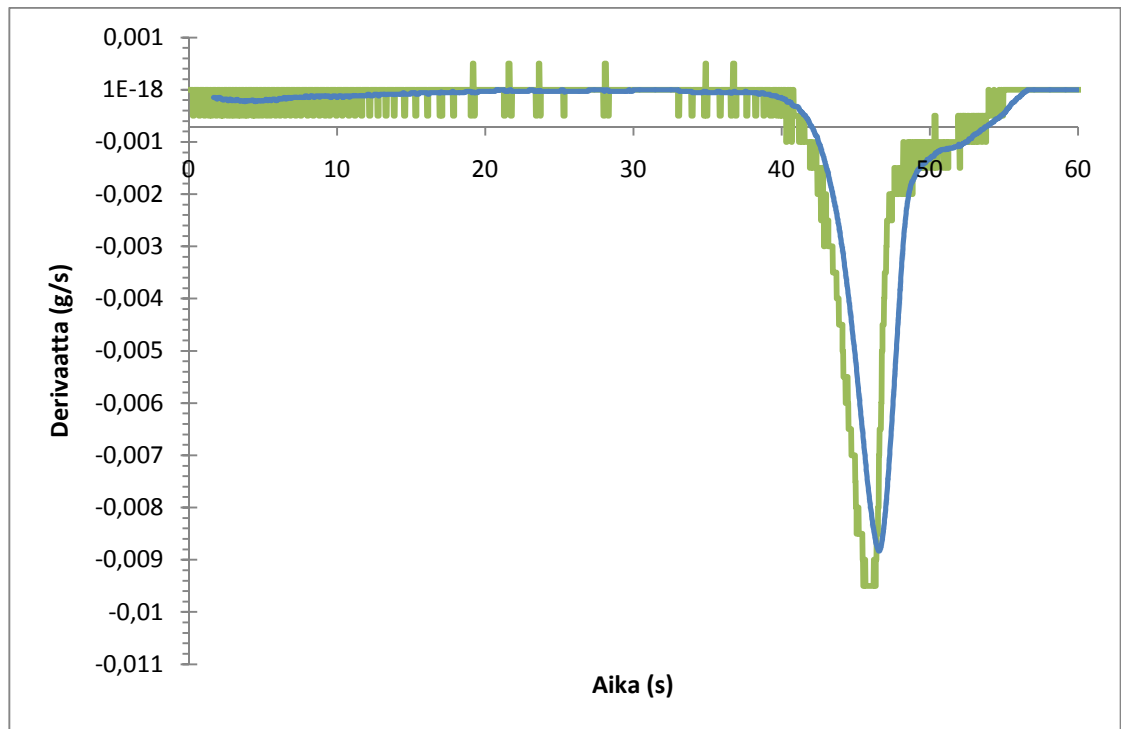
Suurin ongelma ohjelmistossa on derivaatta-käyrän muodostus. Käyrän muodostamisessa käytetään kehitysympäristön tarjoamia derivaattablokkeja, jotka muodostavat ongelman muutosten ollessa erityisen pieniä. Mikäli ajonaikaiset massan muutokset ovat mitattavissa olevia minimiarvoja (1 mg), voidaan derivaattakäyrässä havaita pulssimaista käyttäytymistä. Pulssit vaikeuttavat huomattavasti käyrän lukemista ja hahmottamista. Ne tekevät käyrästä tasapaksun ja häivyttävät mahdolliset käyrän muutokset. Derivaatan selkeyttämiseksi asiaa on pyritty lähestymään usealta kantilta:

- Derivaatan määrittäminen ja eri laskukaavan käyttö
  - Derivaatta määritettiin 2.- ja 3.pisteen tarkkuuksilla mutta nämä heikensivät jo olemassa olevaa tarkkuutta (muutosten havainnointi vaikeutui).
  - Ei havaittavaa hyötyä käyrän selkeyttämiseksi.
- Derivaatan määrittäminen joka kolmannen pisteen perusteella.
  - Mikäli  $dt$ -käyrä esitetään samassa koordinaatistossa kuin muut mitatut arvot ja halutaan säilyttää vertailu kelpoisuus:

- on joko tarpeellista varmistaa pisteiden määrä samaksi kaikissa käyrissä valitsemalla joka kolmas piste myös muista käyristä
- tulee derivaatta käyrän pisteitä kopioida siten, että saadaan käyrän pisteiden määrä samaksi kuin muissa käyrissä.
- Kummallakin metodilla korostettiin liikaa derivaattakäyrässä esiintyvää virhettä, eikä kumpikaan metodi onnistunut selkeyttämään käyrää tarpeeksi
- Liukuvan keskiarvon soveltaminen käyrän tasoitukseen.
  - Derivaattakäyrän keskiarvoistaminen
    - Jälkiprosessointi tuotti lupaavia tuloksia mutta ongelmaksi jäi mahdollinen mittausdatan luotettavuuden heikentyminen, keskiarvoistamisen siirtäessä huippuja ja muutoskohtia.
    - Vertailu ja testaus tarkoituksessa käyrää keskiarvoistettiin 10-, 30- ja 100-pisteen tarkkuuksilla.
  - Massakäyrän keskiarvoistaminen ennen derivaatan määrittystä
    - Keskiarvoistaminen poistaa kaikki pulssimaiset massan muutokset ( $\pm 1$  mg) ja tasoittaa nosteen aiheuttamaa virhettä massan mittauksessa.
    - Derivaatan määrittelyn kannalta tärkein on massakäyrän lineaarisointi (pulssien poisto), jolloin derivaattakäyrästä saadaan luotettavampi

Tyypillinen mittausohjelman luoman derivaattakäyrän virhe on hyvin nähtävissä liitteessä 10.

Derivaattakäyrän selkeyttämiseksi päädyttiin käyttämään liukuvaa keskiarvoa, jossa vaikeasti luettava pulssimainen käyrä muokataan tasaisemmaksi keskiarvoistamalla (ks. kuvio 18). Lopullisessa sovelluksessa sekä luettava massakäyrä, että tuotettu derivaattakäyrä ajetaan keskiarvoistuksen läpi.



KUVIO 18. Liukuva keskiarvoistus

### Lämpötilamittaus

Derivaatan ohella ongelmia aiheuttivat lämpötilamittausta häiritsevät, lämmityskäämien magneettikentästä johtuvat, mittausvirheet. Lämmityselementin käämien aiheuttama magneettikenttä aiheutti termoparimittauksiin pulssimaista useiden kymmenien asteiden virhettä, joka teki mittauksesta epäluotettavan. Mittausvirhettä korjaamaan kehitettiin ohjelmistollista suodatusta, jolla pyrittiin poistamaan pulssimainen virhe mittausdatasta. Suodatuksen säätöjen tekemistä hankaloitti mittausolosuhteissa normaalisti tulevat lämpötilavaihtelut, joiden tuli esiintyä lopullisessa datassa. Lämpötilan äkilliset nousut ja laskut saattoivat lukita lämpötilamittauksen tilaan, jossa tavalliset muutokset jätettiin huomiotta. Esimerkki mittausvaiheen lopussa ilmenneessä suodatusvirheestä on nähtävissä liitteessä 10. Suodatuksen haasteellisuuden vuoksi se poistettiin myöhemmin ohjelmasta ja sen tilalla pyrittiin minimoimaan anturien mittaamaa virhettä suojaamalla ne magneettikentältä.

### 7.2.2 Laitteistolliset ongelmat

Ohjelmistollisten ongelmien lisäksi etenkin termovaa'an mukana toimitettu laitteisto tuotti huomattaviakin ongelmia.

Laitteistopohjaisista ja ohjelmistollisista ongelmista ehdottomasti eniten ongelmia aiheutti vanha laboratoriovaaka, jonka avulla gravimetri määrittä kappaleen massan ja sen muutokset. Vaa'an RS232-sarjaliikenneportti siirtyi vikatilaan aina, kun syöttöjännitteessä tai kytkentäkaapelissa tapahtui jotain odottamatonta. Vikatilastaan vaaka ei raportoinut ulkoisesti millään lailla vaan se ilmeni lukuarvon puuttumisena tietokoneella dataa luettaessa. Syöttöjännitteen häiriöiden ollessa pieniä ja kaapelin ollessa hyvin kiinnitettynä, saattoi silti vaaka siirtyä vikatilaan ja näin pilata monia polttokokeita. Tämä saattoi myös johtua laitteiston kuumenemisestä mutta tätä ei kyetty varmistamaan ongelman satunnaisten luonteen vuoksi. Mittauslangan lämpenemisen uskotaan aiheuttavan vaakaan myös vakavaa mittausvirhettä, yleensä mittausohjelman loppuvaiheessa. Tämä mittausvirhe ilmenee vaa'an lukeman suurena (1 - 100 mg) heittelynä. Vaa'an tarkkuus (1 mg) aiheuttaa myös mittausdataan pulssimaista virhettä, joka edelleen vääristi derivaattakäyrän muodostamista. Virhe on nähtävissä liitteen 11 massakäyrässä, mittauksen loppuosassa.

Haasteita tuotti myös kattilan lämmityselementti jonka muodostaman magneettikentän aiheuttamat virheet vääristivät lämpötilamittausta ja pakottivat luomaan ohjelmallisen suodatuselementin. Lämpötilamittauksessa muodostui ongelma-alueeksi 400–600 °C, jossa mittausvirheiden todennäköisyys moninkertaistui. Lämpötilamittauksen virhe on nähtävillä Liitteen 11 kuvassa, jossa mittausvirheet alkavat 400 °C jatkuvat mittauksen loppuun asti.

Lämpötilamittauksen aikana satunnaisesti toistuvaa virheiden aiheuttajaa pyrittiin etsimään mutta ongelmallisen 400 – 600 °C lämpötila-alueen virheen aiheuttajaa ei pystytty selvittämään. Liitteessä 12 on esitetty suodatuksen poiston jälkeinen lämpötilakäyrän virheellinen muutos. Tarkastellessa termoparien mittauks tuloksia, havaittiin termoparien mittaavan hyvin voimakkaita ( $1 \cdot 10^{13}$  °C) jännitteen vaihteluita, joiden vuoksi pistelukemat erosivat suuresti toisistaan.

Virheen aiheuttajaksi ehdotettiin seuraavia:

- Antureihin kertyy tervaa tai jotain tunnistamatonta ainetta, joka olomuodon muutoksen (neste – kaasu) vuoksi aiheuttaa virheen lähes tarkalleen aina samalla alueella.
  - Virhe esiintyi myös anturien puhdistuksen jälkeen tyhjässä uunissa.
- Lämmityselementin aiheuttama magneettikenttä indusoi antureihin heikon sähkövirran joka häiritsee mittausta
  - Todennäköisin vaihtoehto
  - Kvartsiputken alaosaan liitettiin metalliverkko joka maadoitettiin laitteen rakenteeseen, sekä putki päällystettiin alumiinifoliolla joka maadoitettiin myös rakenteeseen. Putken sisältö eristettiin näin Faradayn häkillä sähkömagneettiselta vaikutukselta.
    - Ei havaittavaa hyötyä
- Antureissa käytetyt metallit reagoivat näytteiden kanssa
  - K-tyyppisten anturien metalleista etenkin alumiini reagoi näytekalvojen kanssa. Ratkaisuksi kävisi termoparien vaihtaminen R- tai S-tyyppisiksi (platinapohjaisiksi).
    - Vaihto ei rakennusvaiheessa kuitenkaan ollut rahoituksellisista syistä johtuen mahdollista.

### 7.3 Laajennusmahdollisuudet tulevaisuudessa

Suunnitteluvaiheessa mittaussolun ominaisuuksista rajattiin pois useitakin mahdollisia laajennusvaihtoehtoja, käsittäen pääasiallisesti ohjelmallisia laajennuksia.

Alustavien suunnitelmien mukaan ohjelmiston lämmitysprofiilia tullaan muokkaamaan. Tarkennuksen kohteena on etenkin lämpötilan nousukäyrän tutkiminen ja nousunopeuden rajoittaminen haluttuun aste / minuutti – nopeuteen.

Toimenpide parantaa huomattavasti polttokokeiden toistettavuutta ja näin parantaa tutkimustulosten luotettavuutta.

Suunnitteluvaiheessa suunniteltua kansiopohjaista tietokantaratkaisua voitaisiin huomattavasti laajentaa. Käyttämällä kehittyneempiä ratkaisuja voitaisiin tietokanta toteuttaa käyttöliittymällä ja käyttäjäprofiileilla. Tietokanta voitaisiin asentaa myös serveripohjaiseksi, keskitetyksi yksiköksi, josta informaatio olisi luettavissa koko yliopiston alueelta. Tämä ratkaisu tosin nostaa ohjelman käyttöastetta ja monimutkainen tietokanta ratkaisu vaatii käyttäjiltään pitempää perehdytysjaksoa.

Mittausohjelmisto itsessään voitaisiin muokata tukemaan verkkopohjaista käyttöä, jolloin mittauslaitetta kyettäisiin operoimaan etäpäätteiltä. Pitkien mittausten vuoksi olisi mielekäästä mm. tarjota verkkosivun muodossa käyttäjälle informaatiota laitteiston tilasta ja mittauksen kulusta.

Hankkimalla lisälaitteistoa ja muokkaamalla ohjelmaa voidaan tietenkin testauslaitteistoa muokata loputtomiin mutta termisen analyysin tueksi voitaisiin harkita mm. palokaasuja mittaavan laitteiston asentamista.

Alustavien suunnitelmien mukaan lähitulevaisuudessa laitteiston lämpötilanmittaus- ta tehostetaan vaihtamalla anturointi kokonaan R tai S-tyyppisiin termopareihin, ja uusimmalla antureita suojaava keraaminen suojaputki.

## 7.4 Pohdinta

Opinnäytetyöni erikoistermovaa'an parissa on ollut hyvin mielenkiintoinen ja, ajoittain, yllättävän haastava. Mittausohjelmiston luominen ja etenkin laajennusosien luominen käytettäväksi LabView-ympäristössä, oli hyvin mielenkiintoinen osa työtä. Vaihtovirta asennuksia lukuun ottamatta suoritin laiteasennukset yksin, jonka koen suuresti auttaneen laitteen ymmärryksessä ja etenkin vian etsinnässä.

Mittausohjelmistoa luodessani jouduin paneutumaan ohjelmassa niin yhteensopivuus seikkoihin, kuin resurssien optimointiin. Huomattava osa ohjelman rakennuk-



seen kuluneesta ajasta kuluikin funktioiden ja aliohjelmien optimointiin, mm. siirtämällä aliohjelma suorituksia pois toistorakenteista siellä missä se oli mahdollista.

Ajankäytöllisesti termovaa'an rakennukseen ja ohjelmointiin kulunut aika käsitti ainostaan 40–50 % käytetystä ajasta. Suurin osa opinnäytetyöhön käytetystä ajasta upposi vian etsintään kun lämpötila- ja massamittauksen virheiden lähteitä pyrittiin kartoittamaan. Aihe vaati niin empiirisiä kokeita kuin kirjallisuuslähteiden tutkintakin.

Työhön kuulunut asennustyö, ohjelmointi ja ongelman ratkonta ovat ehdottomasti kasvattaneet sekä tietopohjaani että ammatillista itsevarmuuttani. Työn aikana olen osoittanut itselleni olevani kykenevä rakentamaan ja ohjelmoimaan tieteellisen tutkimuksen tarpeet täyttävän mittauslaitteiston. Työssäni kohtasin ongelmia jotka vaativat minua opettelemaan uutta ja soveltamaan jo tietämääni.

Kaiken kaikkiaan olen tyytyväinen valmistuneeseen kokonaisuuteen ja koen sen täyttävän sille asetetut vaatimukset. Laite ja ohjelmisto tulevat hyvin luultavasti kokemaan muutoksia tulevaisuudessa ja koen luoneeni vankan ja helposti muokattavan pohjan näille muutoksille.

## 8 LÄHTEET

ASTM (American Society for Testing and Materials). 1981. Manual on the use of thermocouples in temperature measurement. 4.p. ASTM International.

Brown, M. 2001. Introduction to thermal analysis. 1.p. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher.

Haines, P. 2002. Principles of thermal analysis and calorimetry. 1.p. Cambridge: The Royal Society of Chemistry.

Jyväskylän yliopisto. 2011. Yliopiston ja koulutusohjelma esittely. Viitattu 1.4.2011. <http://www.jyu.fi/>, esittely sekä Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta, uusiutuva energia.

Lötters, J. 2005. Artikkelit massavirtausmittauksesta ja mittarikehityksestä. Viitattu 1.4.2011. <http://www.bronkhorst.com/>, Downloads, Published articles.

Maunuksela, J. 2011. Yliopistolehti, FT. Uusituvan energian ohjelma. Haastattelu 6.4.2011.

Pietiko Oy. 2009. Artikkelit termopareista. Viitattu 1.4.2011. <http://www.pietiko.fi/>, mittarikirjallisuus, termopari.

O'Dwyer, A. 2006. Handbook of PI and PID controller tuning rules. 2.p. London: Imperial College Press.

## 9 LIITTEET

### LIITE 1 Positionti

Termovaaka	Positiointi	Luotu: 15.3.2011	
Luonut: Aho Juho			
Revisio Nro.	Revisio	Pvm.	
Positiotunnus	Piirin kuvaus	Laite	REV
FIC-1	Virtauksenohjaus	Bronkhorst F-201CV	
FIC-2	Virtauksenohjaus	Bronkhorst F-201CV	
EFC-1	Sähkövirranohjaus	Jännitteenvahvistin	
TP-1		R-tyypin termopari	
TP-2		R-tyypin termopari	
TP-3		K-tyypin termopari	
TP-4		K-tyypin termopari	
TP-5		K-tyypin termopari	
WI -1		Sartorius BP310S	
S01		Sekoitinsäiliö	
S02		Kuivatussäiliö	
S03		Uuni	
S04		Kvartsiputki	
SK01		Sähkökaappi	

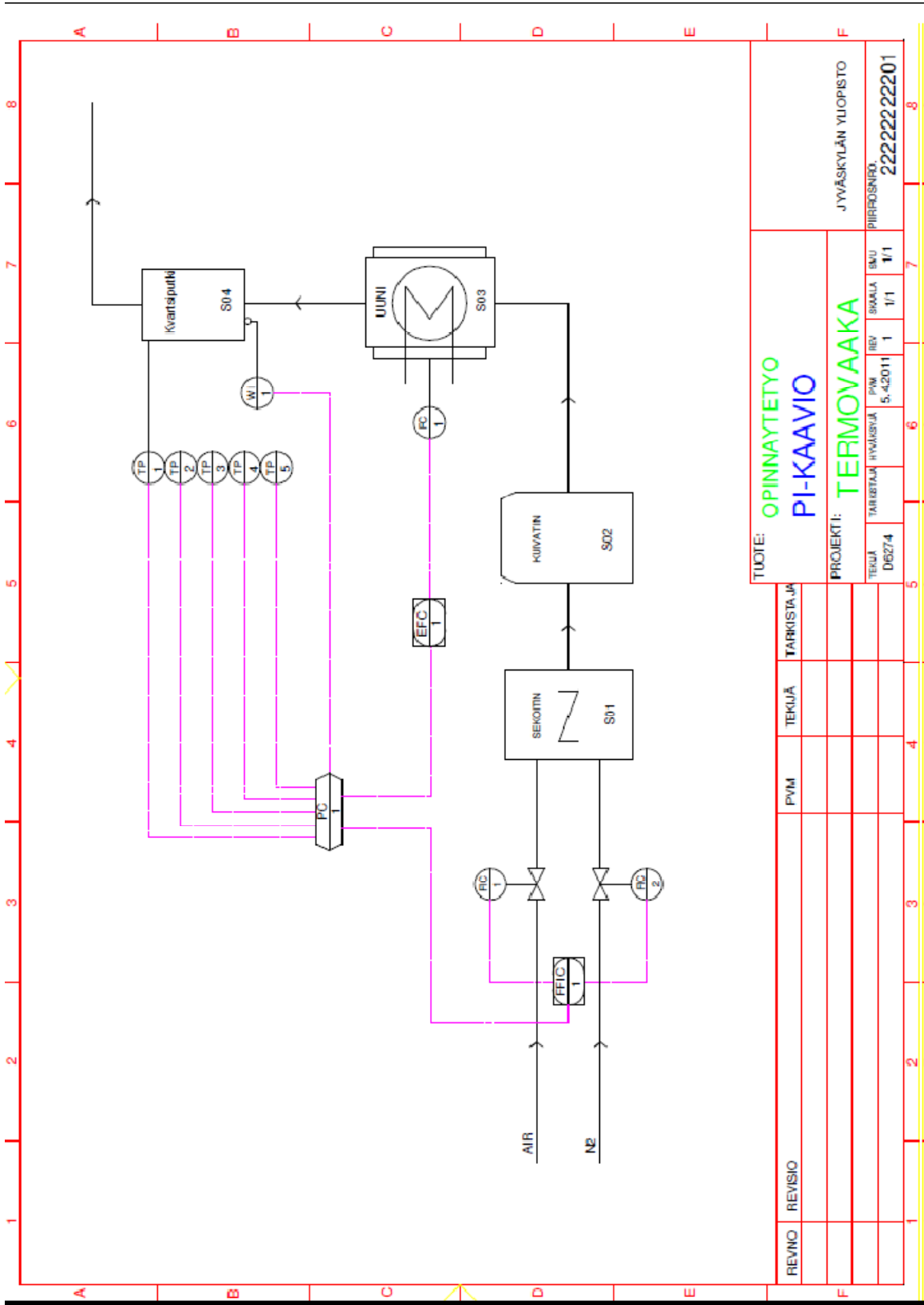
**LIITE 2: KytKentälista**

Termovaaka		KytKentä			Luotu: 15.3.2011
Luonut:		Aho Juho			
Revisio Nro.		Revisio			Pvm.
Positiotunnus		Johdin	Liitin	Laite	REV
TP-1	+ -	Kompensointikaapeli	65 31	SCB-68	
TP-2	+ -	Kompensointikaapeli	33 66		
TP-3	+ -	Kompensointikaapeli	30 63		
TP-4	+ -	Kompensointikaapeli	28 61		
TP-5	+ -	Kompensointikaapeli	60 26		
EFC-1	+ GND	RG-58 °C/U koaksiaalikaapeli	22 56		
WI-1	DB-25	RS232	COM1	PC	
FIC-1	DB-9	RS232	COM3		
FIC-2	DB-9	RS232	COM6		
SK01	Ohjaus + Ohjaus -	2mm^2 parikaapeli	Ohjaus + Ohjaus -	EFC-1	
	Kytkin + Kytkin -	2mm^2 parikaapeli	Kytkin + Kytkin -		

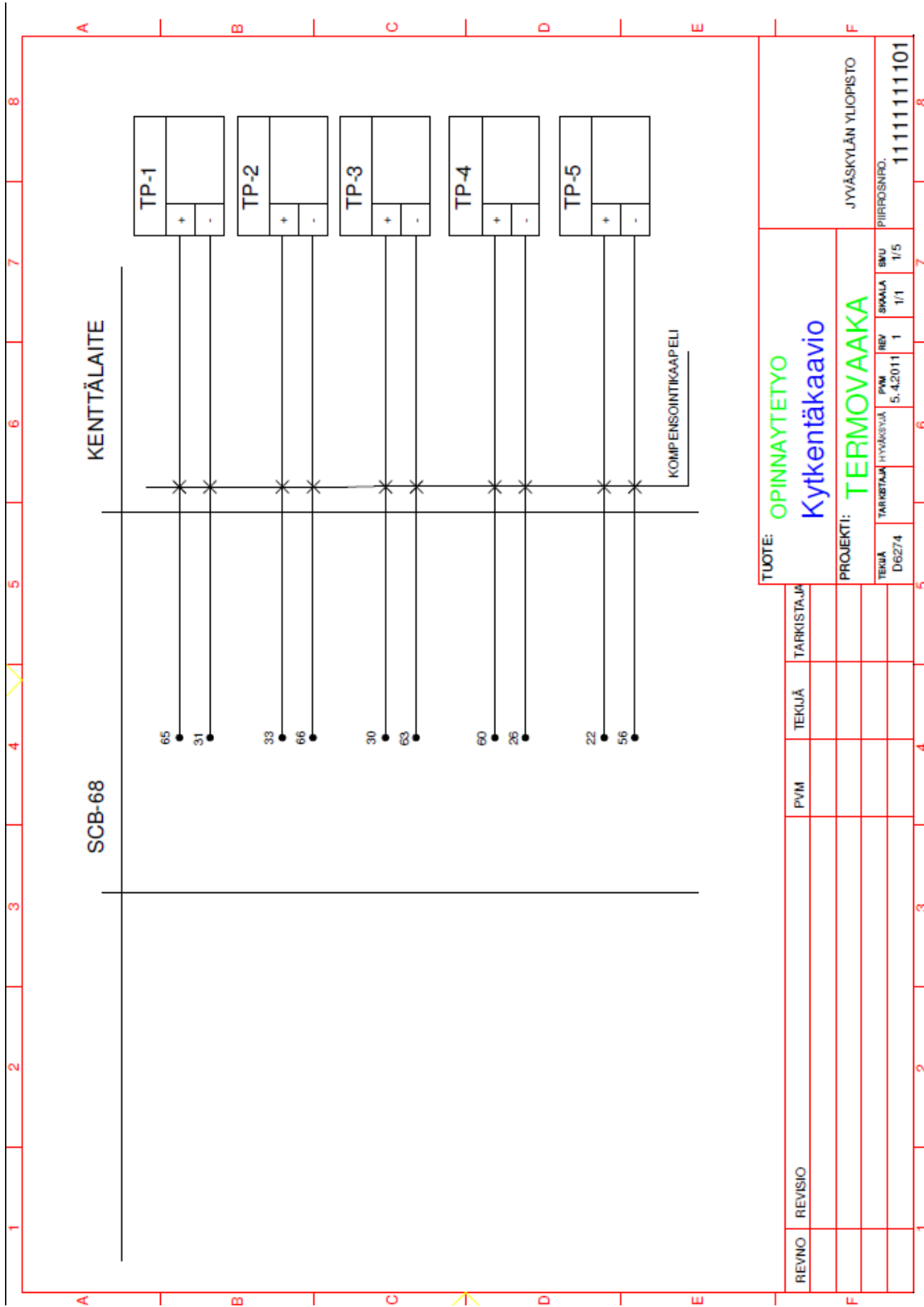
**LIITE 3: Mittapisteet**

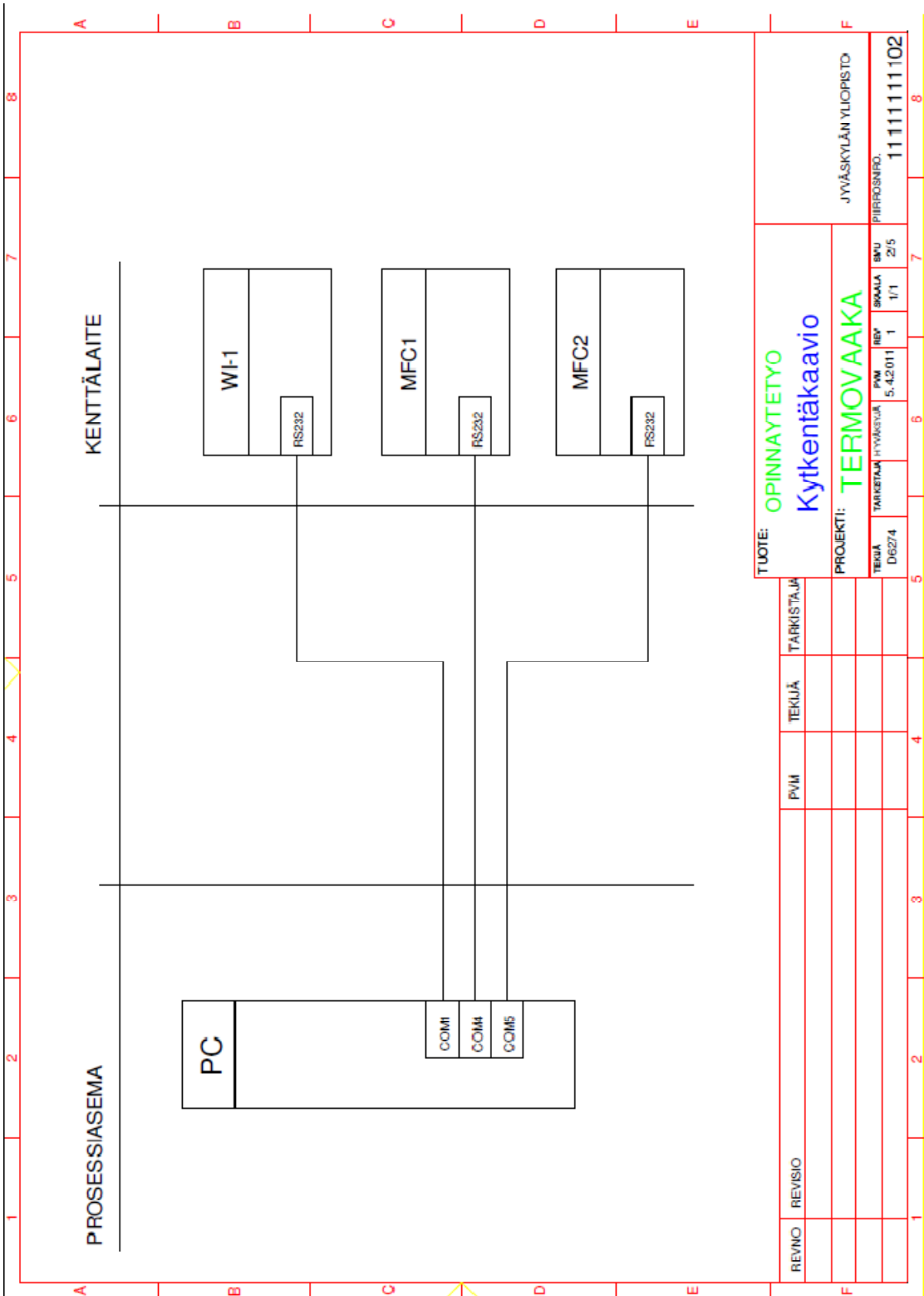
Termovaaka		Mittapisteluettelo			Luotu: 15.3.2011	
Luonut: Aho Juho						
Revisio Nro.		Revisio			Pvm.	
Positio	Tyyppi	Laite	Yksikkö	Alue	REV	
TP-1	AI	Virtaus lämpötila	C	0-1600		
TP-2	AI	Virtaus lämpötila	C	0-1600		
TP-3	AI	Virtaus lämpötila	C	0-1100		
TP-4	AI	Virtaus lämpötila	C	0-1100		
TP-5	AI	Virtaus lämpötila	C	0-1100		
WI-1	DI	Panospunnitus	g	0-310		
FIC-1	DI	Tilavuusvirtaus (Ilma)	L/min	0-80		
FIC-2	DI	Tilavuusvirtaus (Typpi)	L/min	0-30		

LIITE 4: PI-kaavio

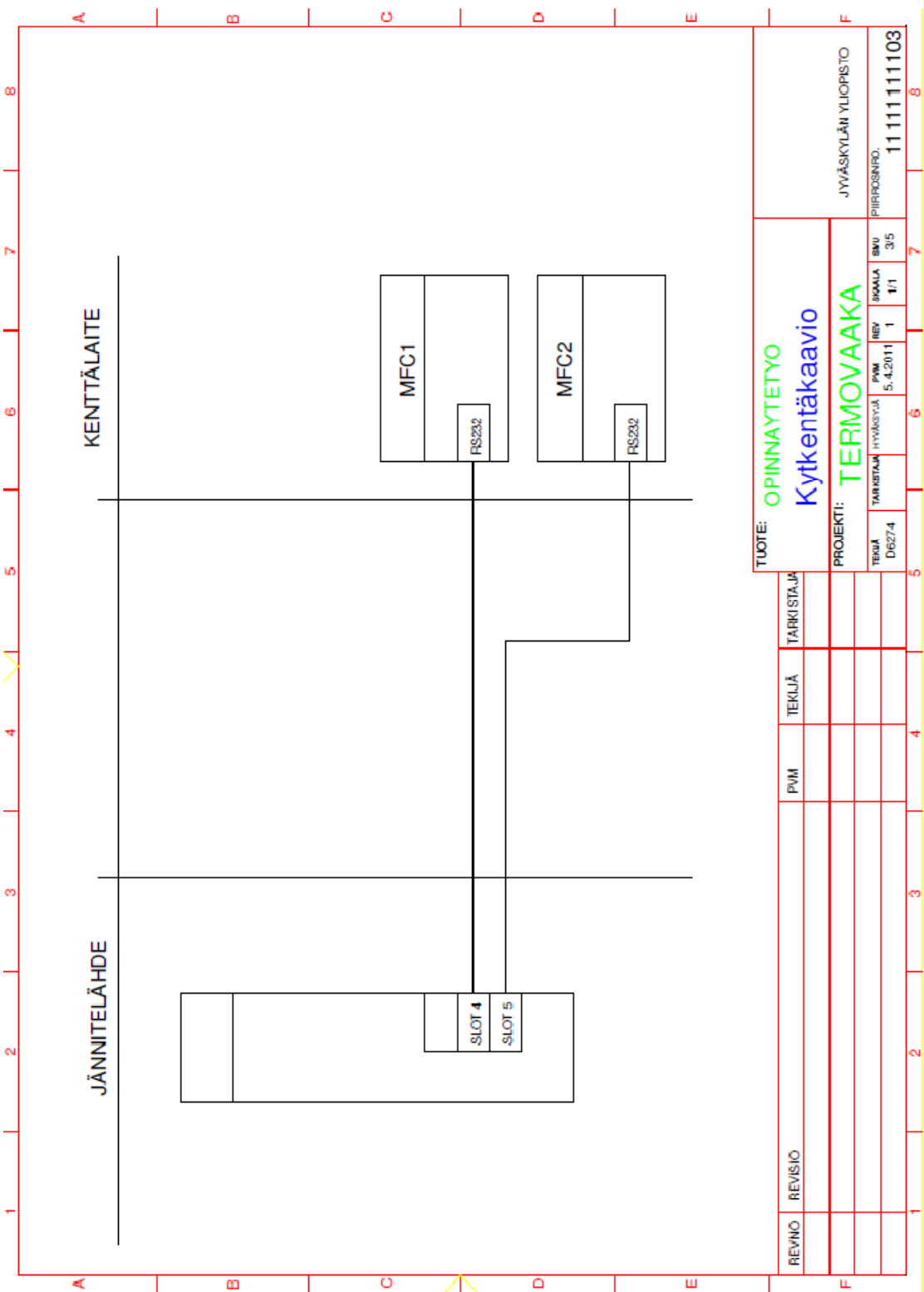


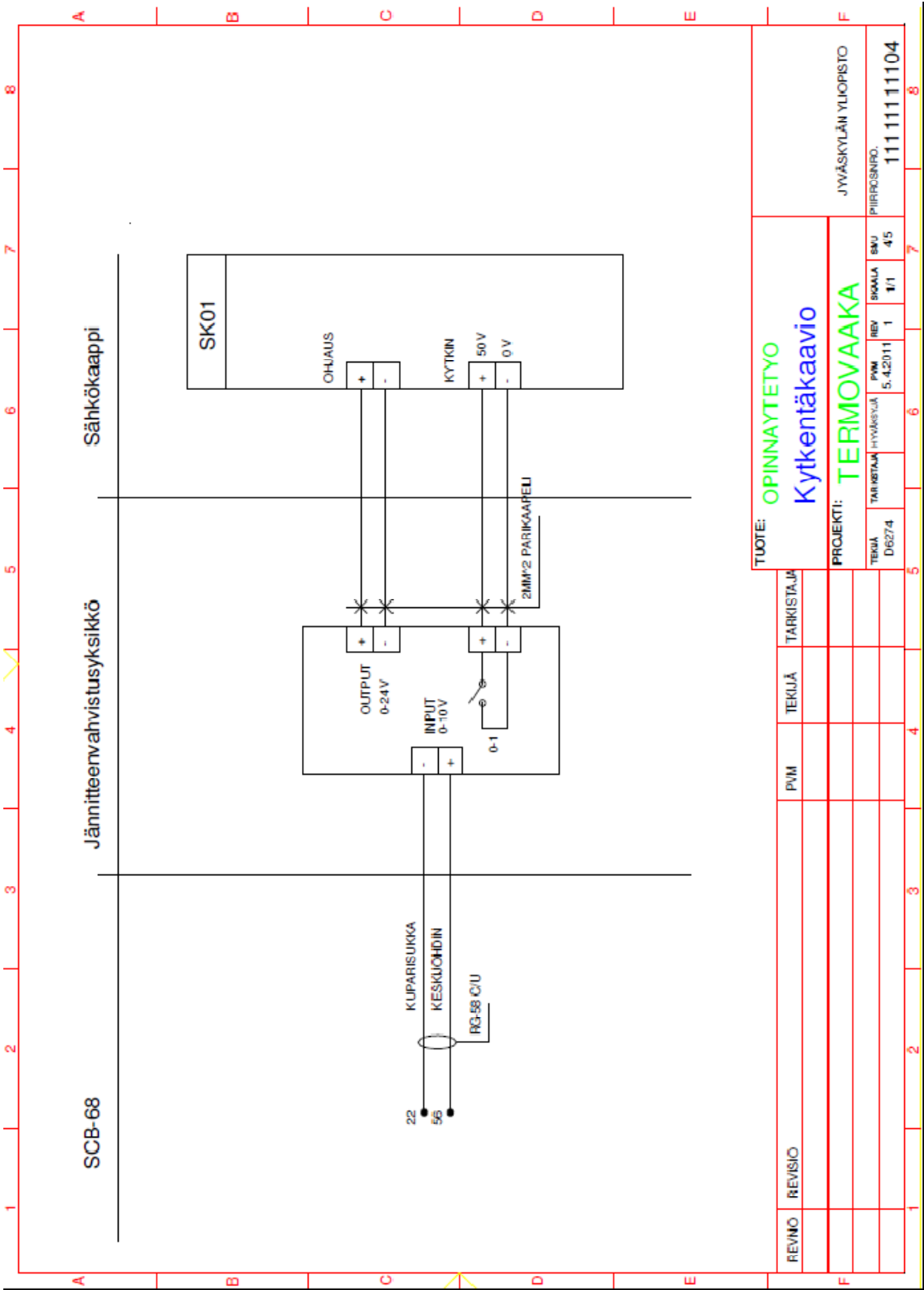
LIITE 5: Kyt Kentäkaaviot (1/5)

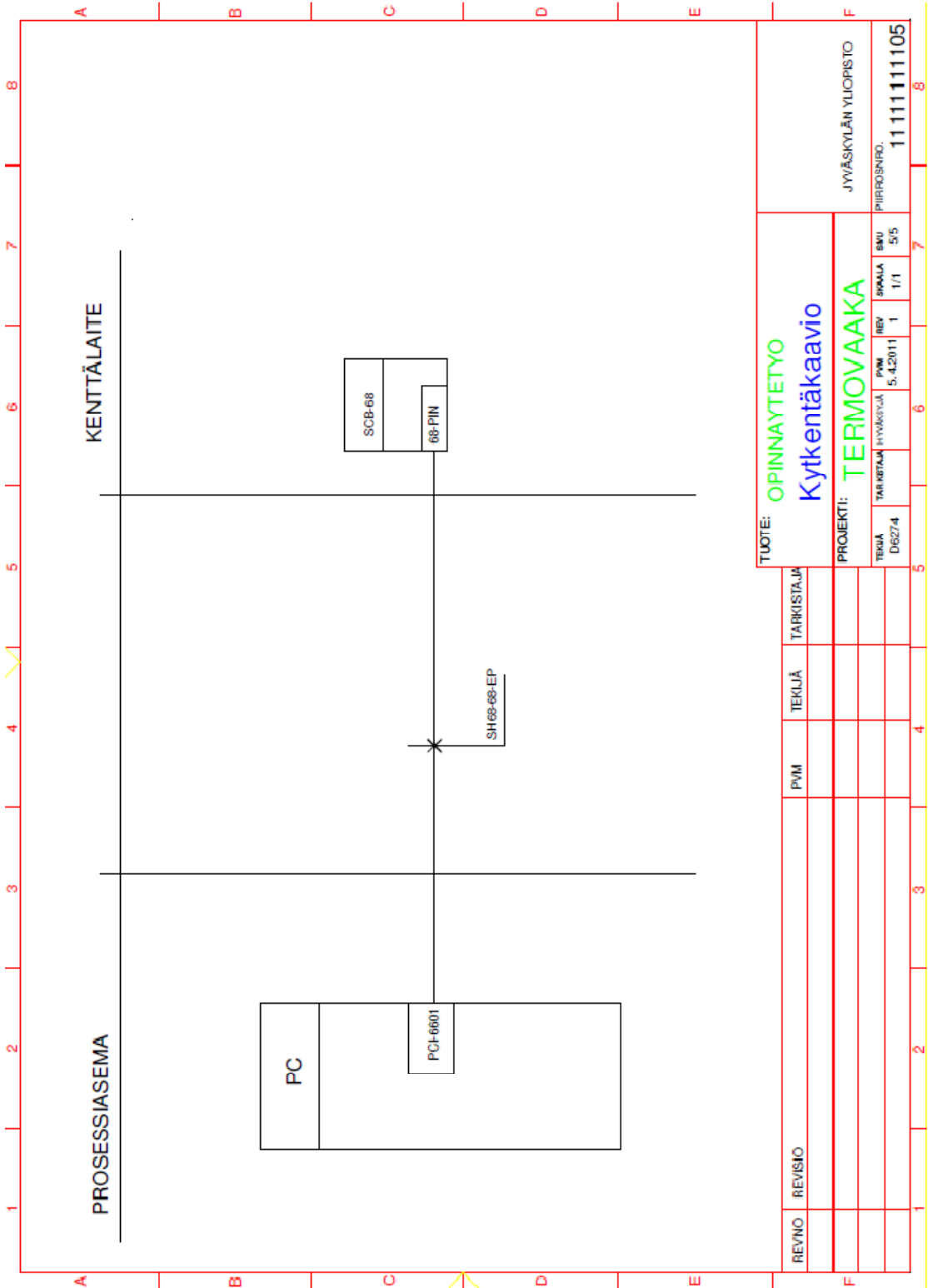




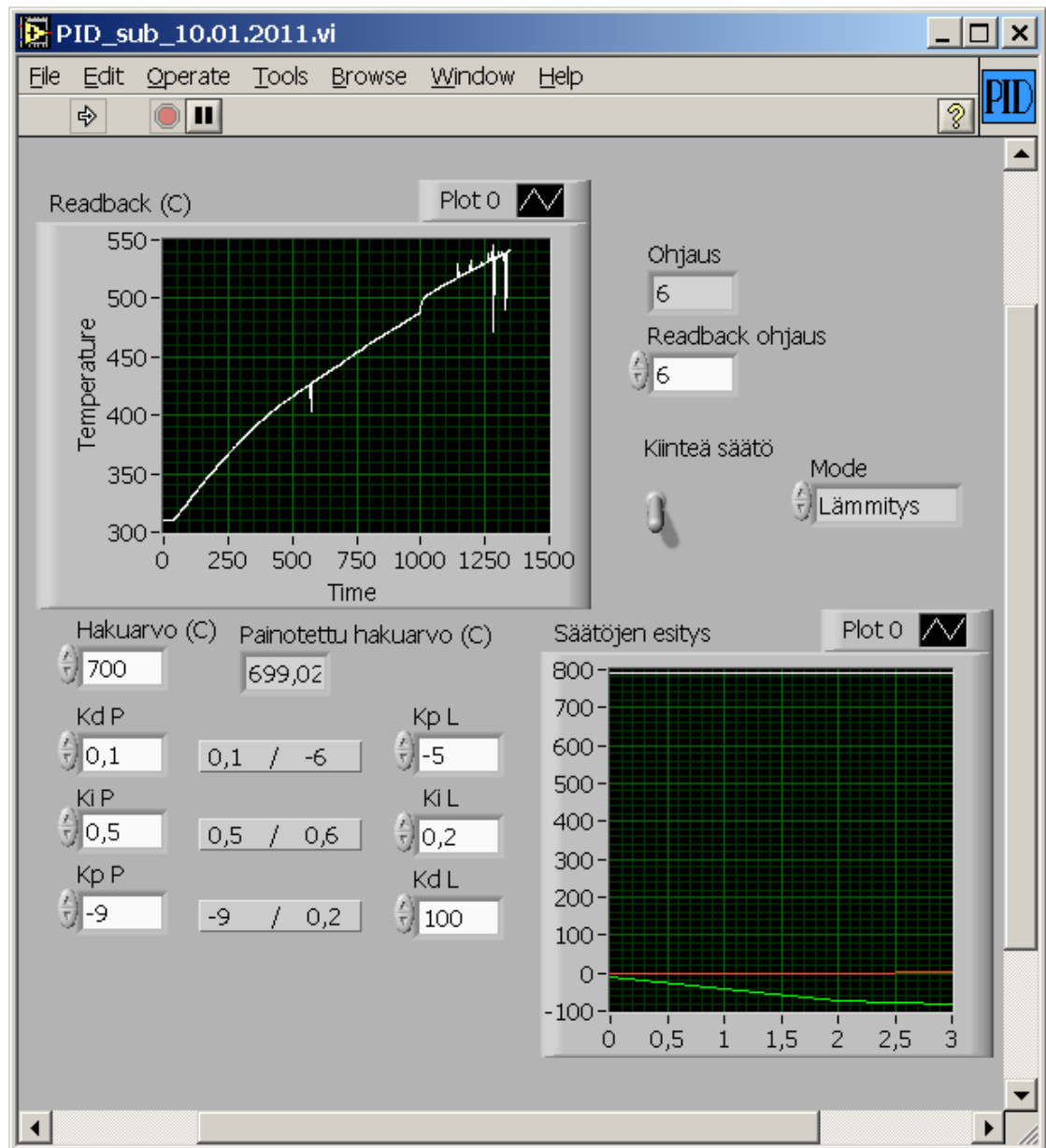




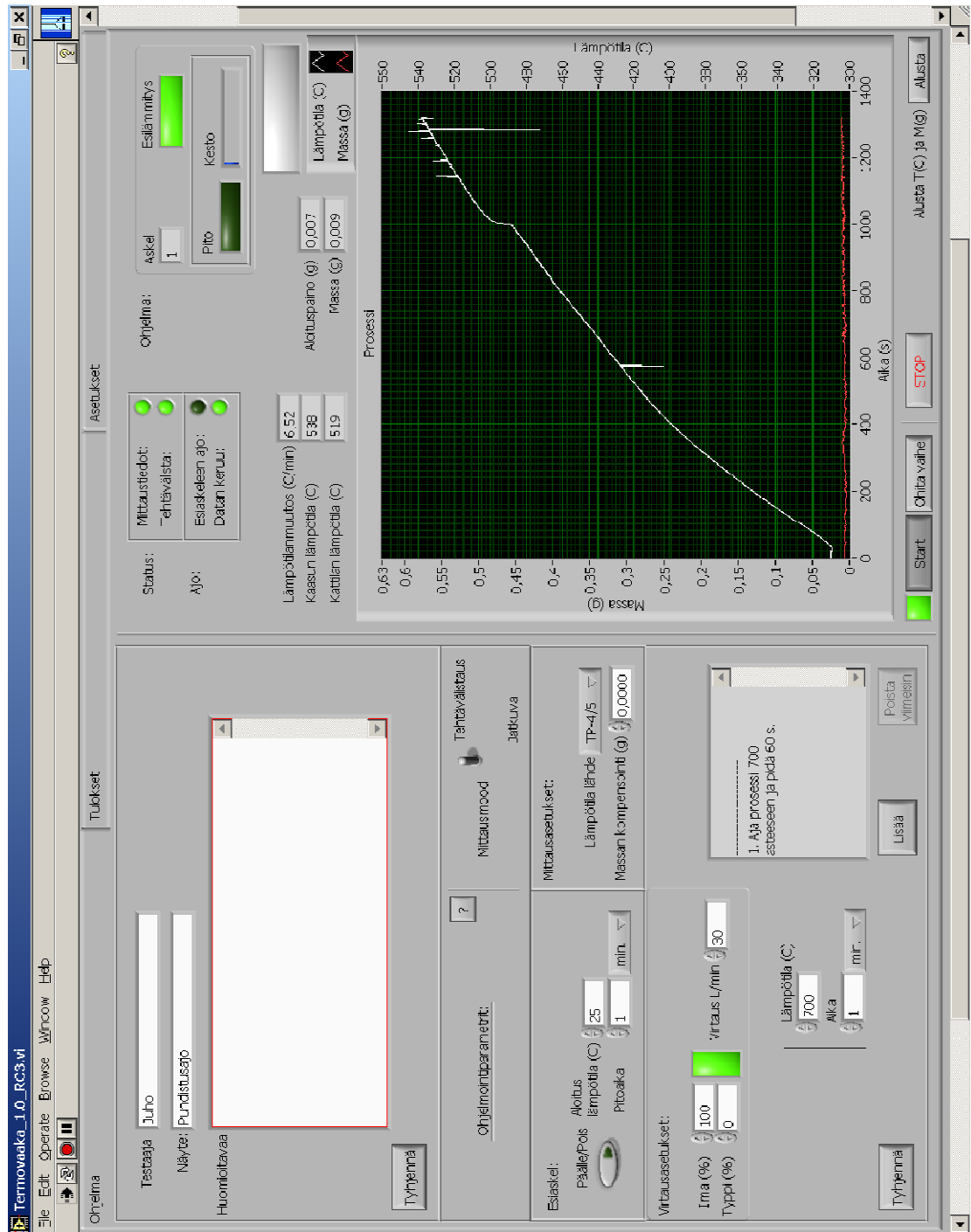




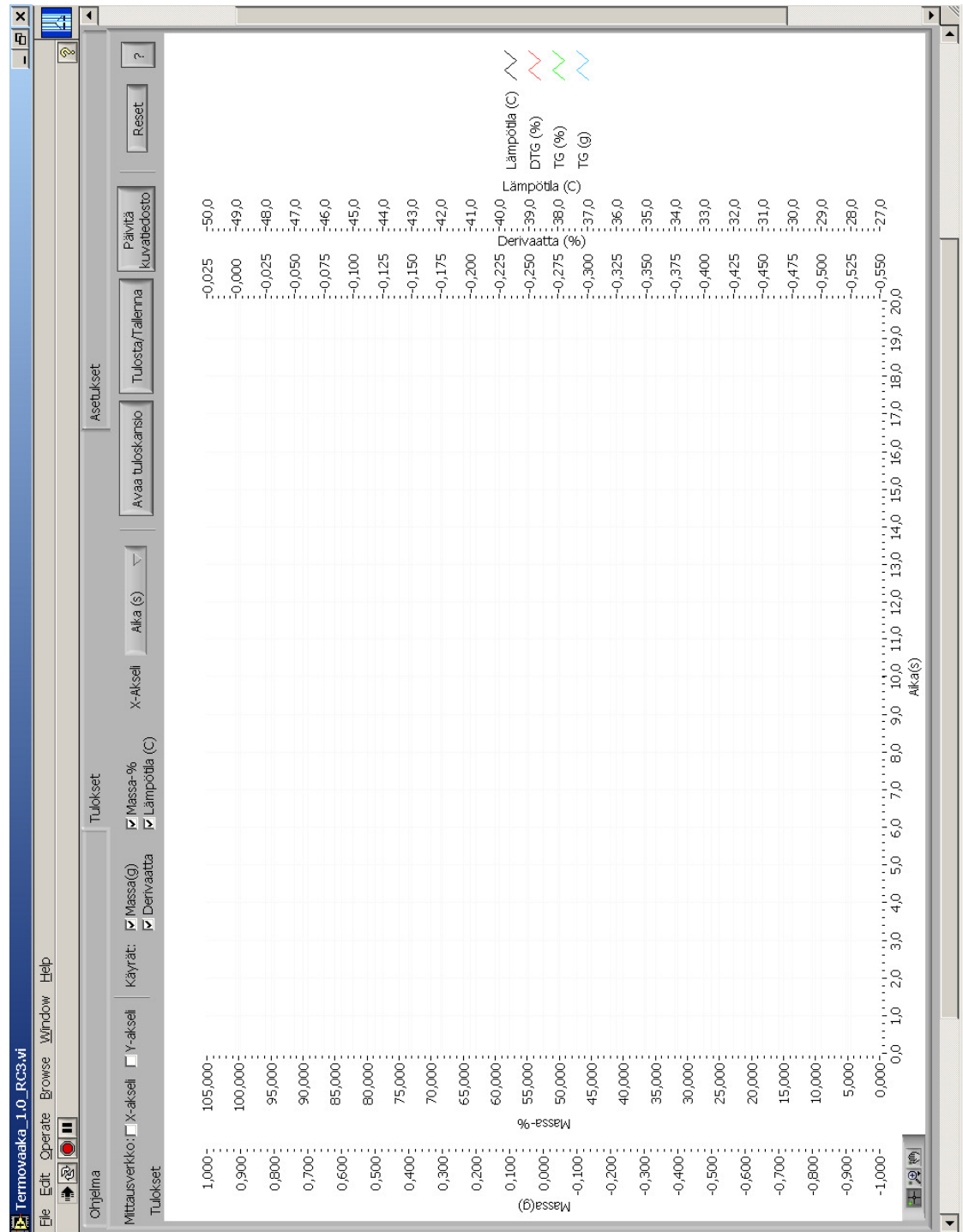
## LIITE 6: PID-säätöikkuna



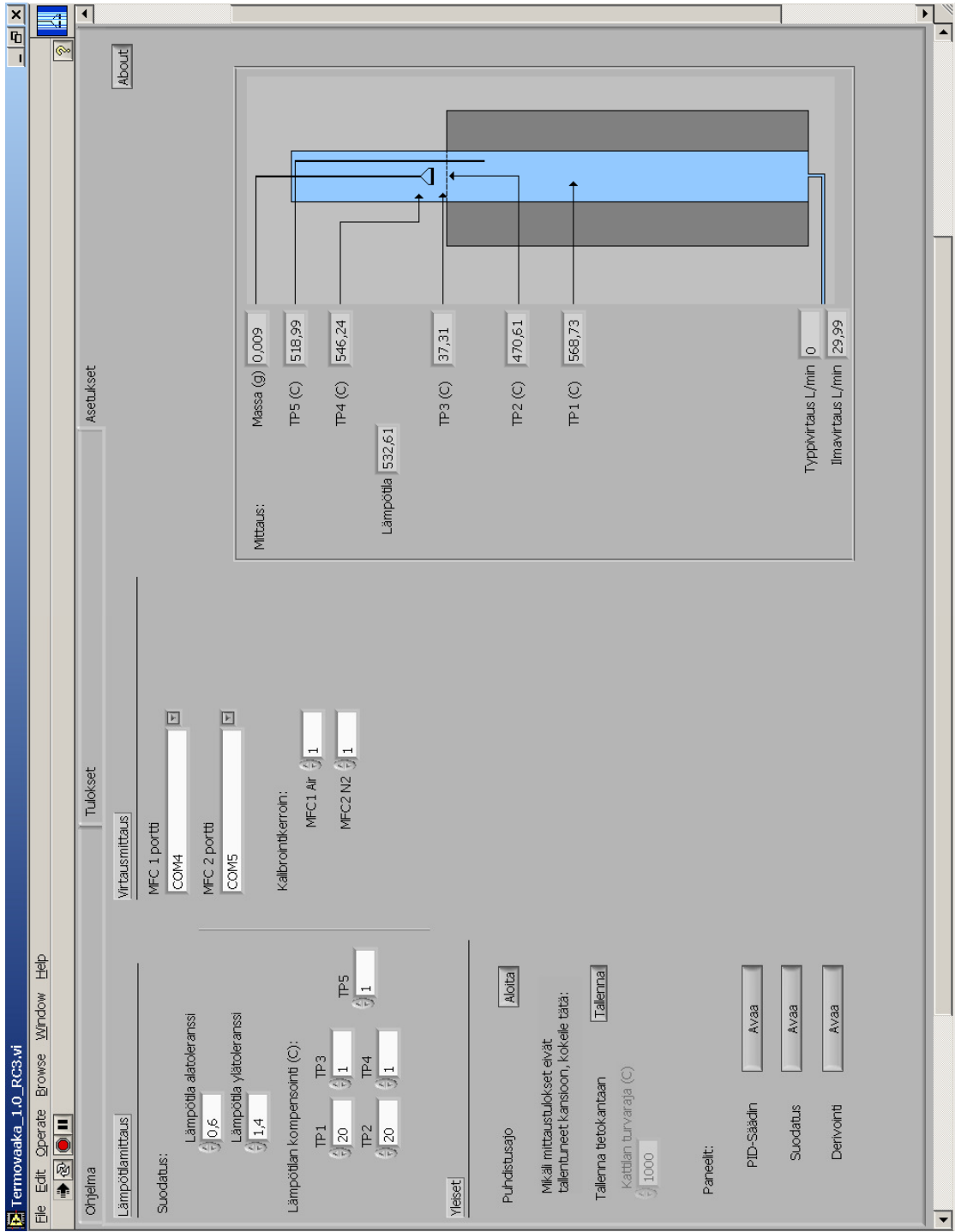
# LIITE 7 Ohjelma-välilehti



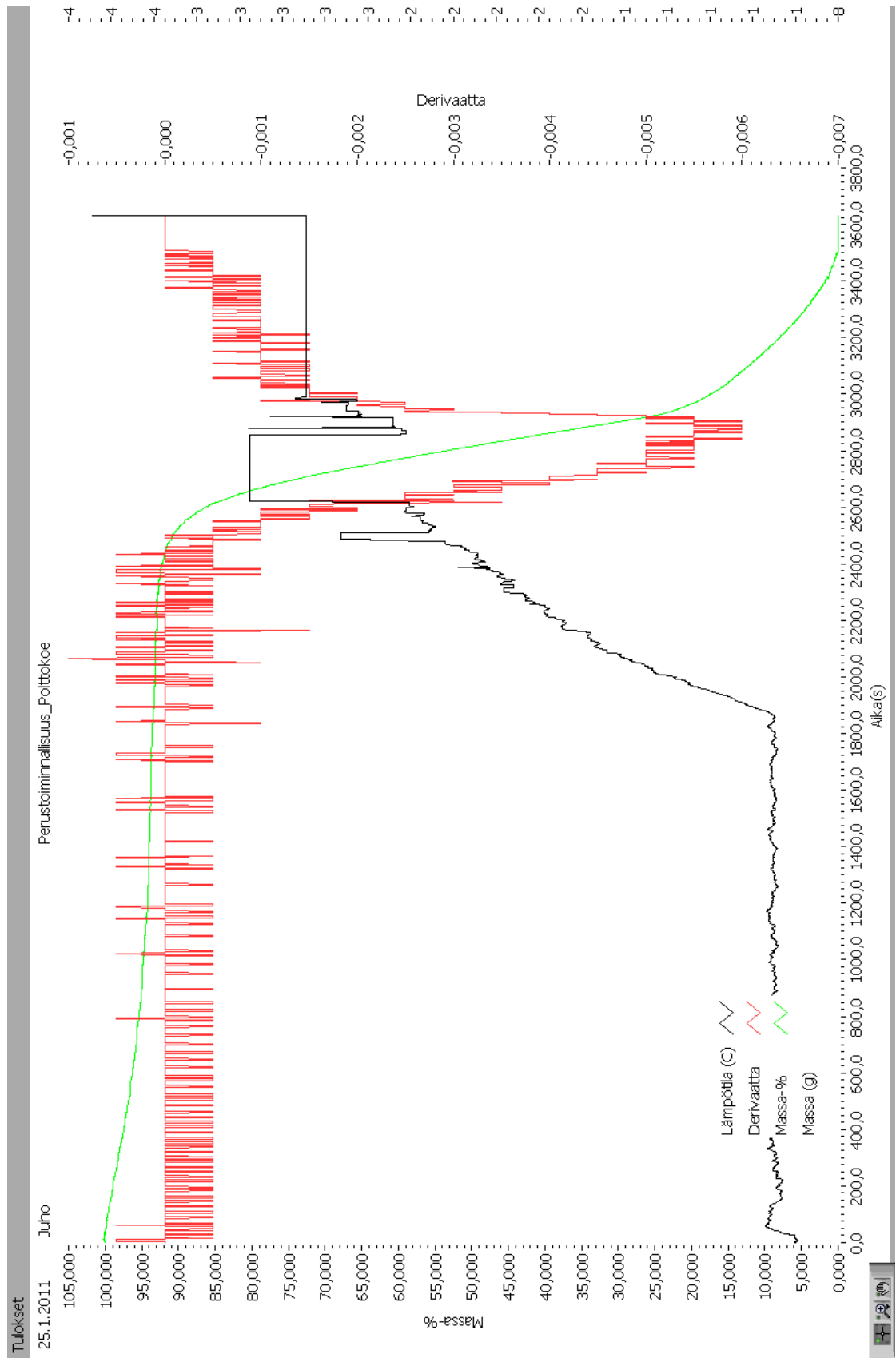
## LIITE 8. Tulokset-välilehti



LIITE 9. Asetukset-välilehti

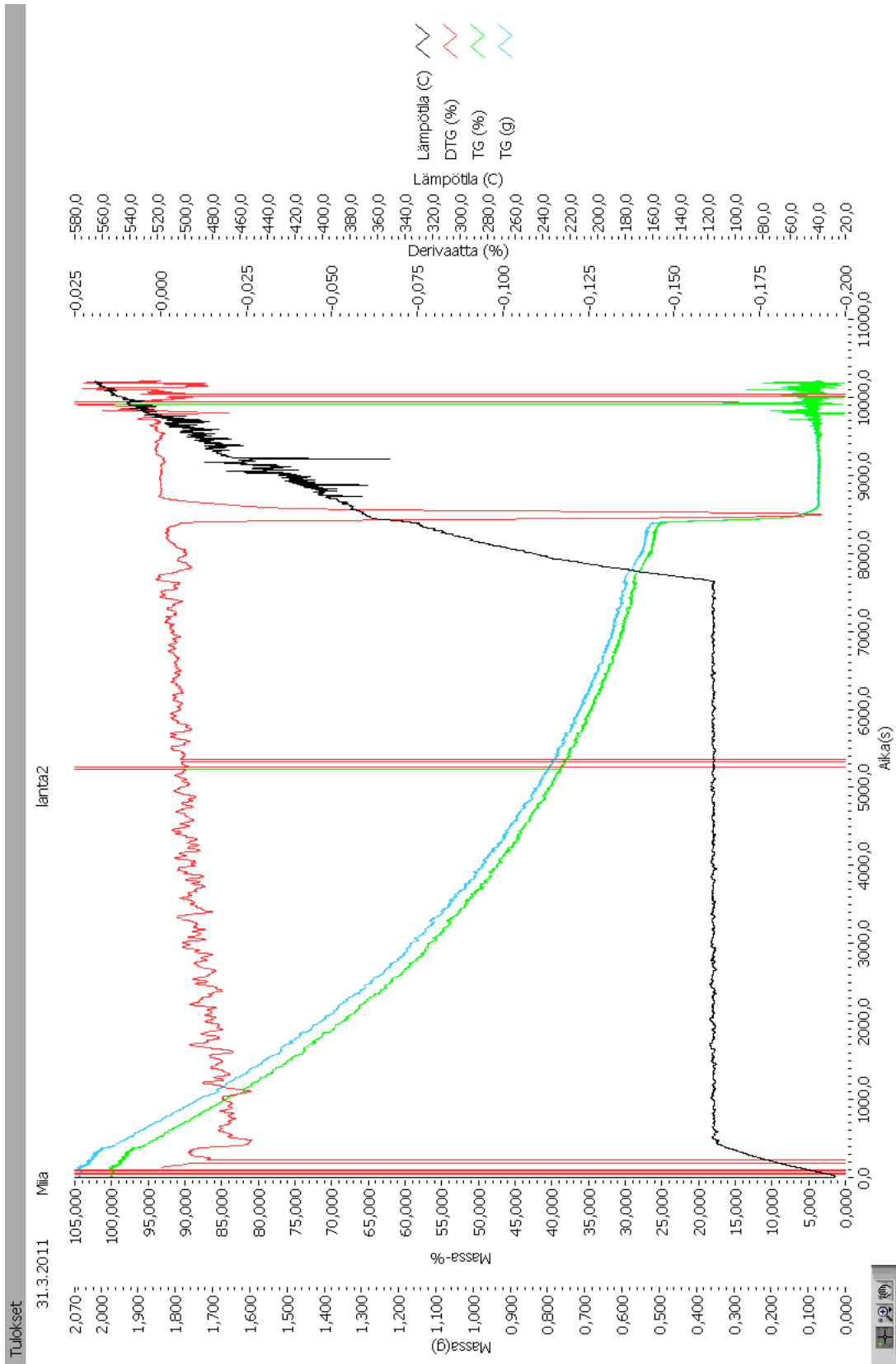


# **LIITE 10 Virheellinen derivaatan muodostus**





LIITE 11 Keskiarvoistetu derivaatta



# LIITE 12 Lämpötilavirhe

